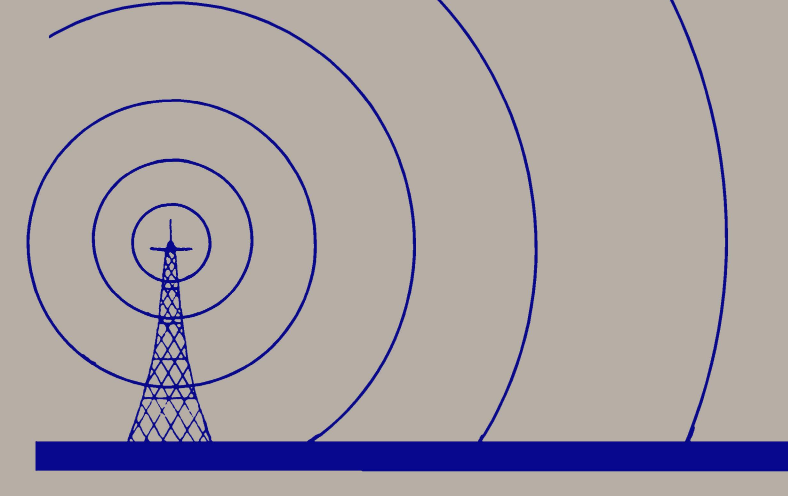
МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА

А. Д. БАТРАКОВ

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ДЛЯ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

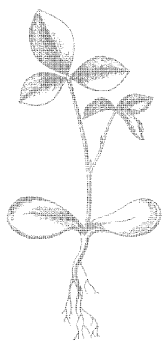
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 58

А. Д. БАТРАКОВ

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ДЛЯ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ

*Рекомендовано
Управлением технической подготовки
Центрального комитета
добровольного общества содействия армии
в качестве пособия
для радиоклубов и радиокружков*





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1950 ЛЕНИНГРАД

В книге изложены элементарные физические основы электротехники. Назначение книги — дать радиолюбителям основные сведения из электротехники, необходимые при изучении основ радиотехники.

Настоящее издание является переработкой книги «Основы электротехники для радиолюбителя» того же автора, изданной в 1937 г.

Редактор *З. Б. Гинзбург* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 4/X 1949 г. Подписано к печати 13/III 1950 г.
Объем 11 п. л. 11,25 уч.-изд. л. 39 800 тип. зн. в 1 п. л. Тираж 50 000
Т 02038 Формат бумаги 84×108[1]/[32]. Заказ 2345

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга написана для радиолюбителей, желающих изучить основы электротехники, необходимые для последующего изучения радиотехники.

Чтобы сделать книгу доступной возможно более широким кругам радиолюбителей, все сложные математические выводы заменены физическими рассуждениями и аналогиями. Все формулы, приведенные в книге, сопровождаются числовыми примерами с решениями. Уровень подготовки, требуемый от читателя, соответствует знаниям в объеме 6—7 классов средней школы.

Цель книги — дать радиолюбителям элементарное изложение физических основ электротехники.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

1. АТОМЫ И ЭЛЕКТРОНЫ

Все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов или молекул. Атомами называются первичные частицы простых веществ — химических элементов, например водорода, кислорода, натрия, хлора. Молекулами называются первичные элементы сложных веществ, например воды, состоящей, как известно, из кислорода и водорода, или поваренной соли, состоящей из натрия и хлора и т. п.

Молекулы состоят из атомов. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, а молекула поваренной соли — из одного атома натрия и одного атома хлора. Молекулы могут быть построены как из различных, так и из одинаковых атомов. Так, молекула газа озона состоит из трех атомов кислорода, а молекула кислорода, входящего в состав воздуха, — из двух атомов кислорода.

В настоящее время науке известно 96 различных «сортов» атомов или 96 различных химических элементов, из которых построен весь окружающий нас мир.

Что же представляют собой атомы, эти первичные «кирпичики» мироздания? Оказывается, атомы имеют довольно сложное устройство.

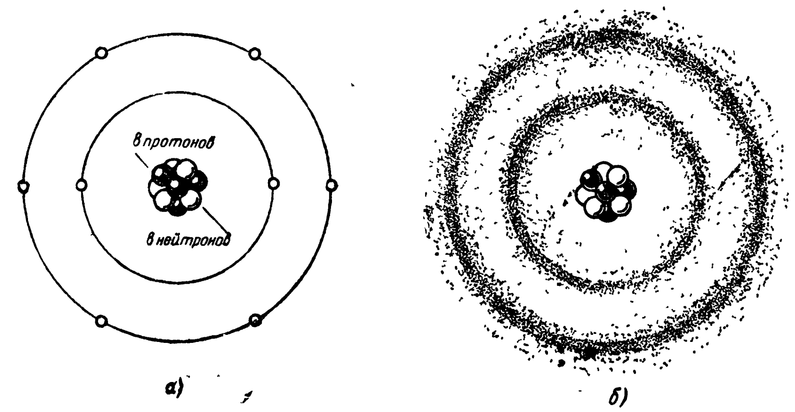
Внутри каждого атома имеется ядро, заряженное положительным электричеством, вокруг которого вращаются частицы отрицательного электричества — электроны.

Советскими учеными Д. Д. Иваненко и Е. Н. Гапоном доказано, что ядра всех атомов состоят из протонов и нейтронов. Протоны — это частицы материи, заряженные положительным электричеством, а нейтроны—незаряженные частицы материи.

Положительный электрический заряд протона всегда равен отрицательному электрическому заряду электрона, а количество протонов в ядре равно количеству электронов, вращаю-

щихся вокруг ядра; поэтому суммарный отрицательный заряд всех электронов в атоме равен положительному заряду ядра. В результате этого равенства зарядов общий электрический заряд атома по отношению к другим частицам вещества равен нулю, так как равные по величине, но различные по знаку заряды нейтрализуют друг друга.

Все сказанное выше относилось в равной степени к атомам всех химических элементов. Чем же отличается атом одного



Фиг. 1. Модель атома кислорода.

а — так выглядит идеализированная модель атома кислорода; *б* — так выглядел бы атом кислорода, если бы нам удалось его сфотографировать: положение отдельных электронов зафиксировать нельзя, можно лишь видеть электронные оболочки (слои).

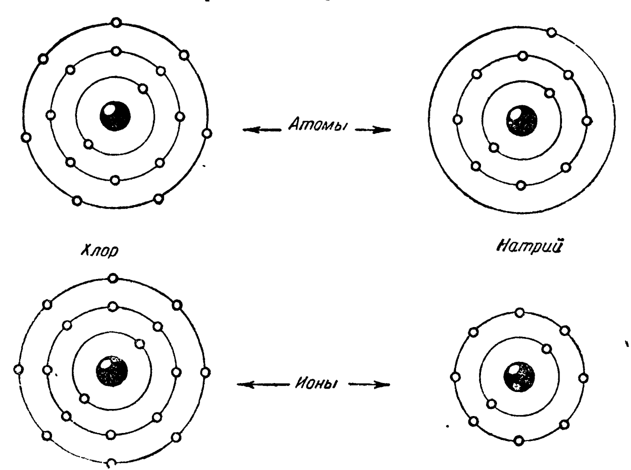
химического элемента от атома другого элемента? Основное отличие — в количестве протонов, находящихся в ядре. Число протонов в атомах простых веществ может лежать в пределах от 1 до 96. Поэтому в природе и существует 96 различных химических элементов.

Электроны, как уже говорилось выше, вращаются вокруг ядра. Орбиты электронов, т. е. пути, по которым они двигаются, все время изменяются по очень сложным законам.

Однако, как бы ни изменялась орбита данного электрона, она не выходит за пределы некоторого шарообразного слоя, окружающего ядро. Таких электронных слоев в атоме обычно бывает несколько. Число электронов в первом слое (самом близком к ядру) не может превышать двух, во втором — восьми, в третьем — восемнадцати, в четвертом — тридцати двух и т. д. Схематическая модель атома изображена на фиг. 1. Химические свойства элементов обусловлены именно

числом электронов, находящихся во внешнем слое. Наиболее устойчивыми в химическом отношении являются атомы, во внешнем слое которых имеется по 8 электронов. Таковы, например, инертные газы (неон, аргон, криптон и др.), не вступающие ни в какие химические соединения с другими элементами.

Атомы, во внешнем слое которых имеется не восемь, а семь или шесть электронов, стремятся захватить электроны



Фиг. 2. Превращение атомов в ионы.

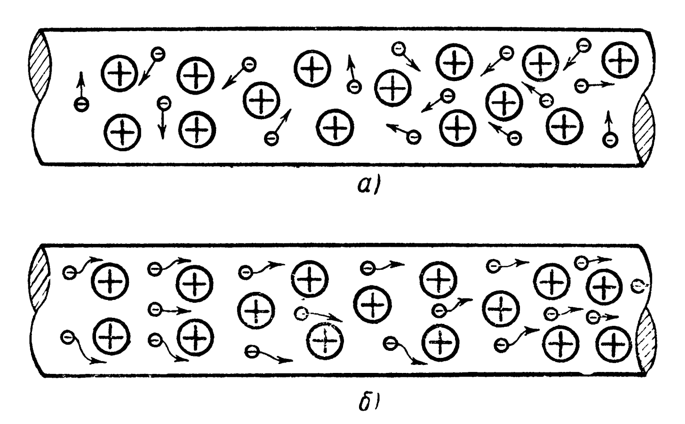
Слева — атом хлора и его отрицательный ион. Справа — атом натрия и его положительный ион.

от других атомов с тем, чтобы дополнить число их в своем внешнем слое до восьми. При этом у атомов отрицательных зарядов становится больше, чем положительных, и атомы превращаются в отрицательные ионы.

Атомы, во внешнем слое которых имеется по одному или два электрона (кроме гелия), легко отдают их другим атомам, а сами превращаются в положительные ионы (фиг. 2).

Во многих веществах, главным образом в металлах, электроны внешнего слоя настолько слабо удерживаются ядром, что они свободно могут «бродить» от одного атома к другому. Эти свободные электроны все время беспорядочно движутся между атомами вещества в различных направлениях. Часто эти электроны называют «электронным газом» из-за сходства их движения с хаотическим движением молекул газа (фиг. 3).

При наличии внешней электрической силы свободные электроны кроме хаотического движения участвуют и в регулярном движении в направлении действия электрической силы. При этом они создают электрический ток. Поэтому вещества, в которых имеются свободные электроны, отличаются тем,



Фиг. 3. Движение свободных электронов в проводнике.

а – Внешней электрической силы нет. Свободные электроны беспорядочно движутся во всех направлениях между молекулами проводника. *б* – Под действием внешней электрической силы свободные электроны передвигаются вдоль проводника.

что проводят электрический ток; поэтому они называются проводниками. Вещества же, в которых внешние электроны прочно связаны с атомами, электрического тока не проводят и называются диэлектриками или изоляторами.

К проводникам относятся все металлы, уголь, графит, а к диэлектрикам: слюда, фарфор, сера, стекло, воздух и пр.

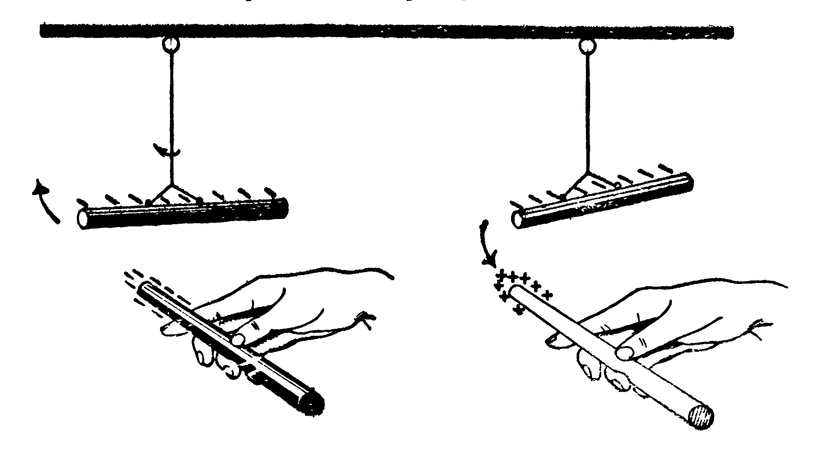
2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

Еще в глубокой древности было замечено, что если натереть янтарь куском шерстяной материи, то он приобретает свойство притягивать некоторые предметы, например волокна шерсти, соломинки и т. п. Позднее было обнаружено, что способность притягивать легкие предметы в результате натирания наблюдается и у других веществ, например у стекла, эбонита и т. п. Кроме того, было замечено, что во время натирания появляются небольшие искры, сопровождаемые слабым треском.

Эти явления были названы электрическими (от греческого названия янтаря — «электрон»), а самый факт приобретения веществами этих свойств — электризацией веществ.

200 с лишним лет назад обнаружили, что электризация тел бывает двух видов.

При трении и вообще при любом способе электризации одно тело электризуется положительно, а другое — отрицательно. При этом положительный заряд на одном теле всегда равен по величине отрицательному заряду на другом теле. Про-



Фиг. 4. Взаимодействие электрических зарядов.

Слева — две эбонитовые палочки, натертые фланелью, заряжаются отрицательно. Если одна из них подвешена на нитке, она будет отталкиваться от другой. Справа — стеклянная палочка, натертая фланелью, заряжается положительно. Если ее поднести к подвешенной эбонитовой палочке, заряженной отрицательно, то последняя будет притягиваться к ней.

исходит это потому, что при электризации часть электронов переходит с одного тела на другое. Тело, наэлектризованное положительно, теряет часть своих электронов, а тело, наэлектризованное отрицательно, наоборот, приобретает их.

Заряженные тела взаимодействуют между собой. Тела, заряженные одноименно (оба положительно или оба отрицательно), отталкиваются друг от друга, а тела, заряженные разноименно (одно положительно, а другое отрицательно), наоборот, притягиваются одно к другому (фиг. 4).

Сила притяжения или отталкивания получается тем большей, чем больше заряды взаимодействующих тел и чем меньше расстояние между ними. Мерой для измерения электрических зарядов или количества электричества в них служит ку-

лон. Количество электричества в формулах обозначают буквой Q, а слово «кулон» буквой *к*.

Количество электронов в одном кулоне выражается огромным числом в 6 280 000 000 000 000 000 шт.! Однако размеры электронов так малы, что все это огромное количество их может уместиться в шарике диаметром около одной миллионной доли миллиметра.

Если бы можно было два таких шарика положить на расстоянии метра один от другого, то они отталкивались бы друг от друга с силой, равной 900 000 тонн!

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрические заряды механически взаимодействуют между собой на расстоянии, хотя между ними нет никакой видимой связи. На первый взгляд взаимное притяжение и отталкивание электрических зарядов через «пустоту» кажется странным. Однако, вспомним, что аналогичным образом все тела притягиваются к земле: всякий предмет, брошенный вверх, падает обратно на землю. Два магнита, если их сближать одинаковыми полюсами, отталкиваются друг от друга, а при сближении разноименными полюсами — притягиваются друг к другу.

В этих случаях взаимодействие происходит также на расстоянии, также через «пустоту», потому что воздушная среда не принимает в нем участия.

Электрические заряды обладают энергией, причем эта энергия заключена не в самом электрическом заряде, а в пространстве, которое его окружает.

Такое пространство вокруг электрического заряда называется электрическим полем.

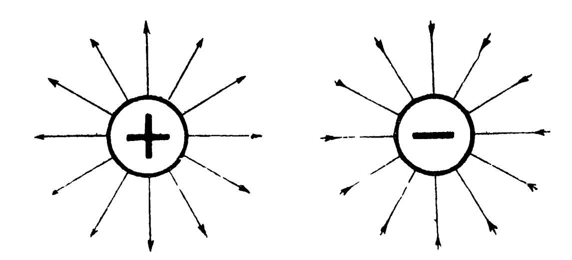
Полем вообще называют пространство, в котором обнаруживается действие каких-либо сил. Например, пространство, где обнаруживается притяжение земли, называют полем земного тяготения, а пространство вокруг магнита, где обнаруживается действие магнитных сил, называют магнитным полем. Взаимодействие электрических зарядов на расстоянии происходит при помощи электрического поля, созданного этими зарядами. Возникновение электрического поля представляет собой изменение состояния пространства вокруг заряжаемого тела.

Если в электрическое поле, созданное одним электрическим зарядом, внести другой электрический заряд, то послед-

ний будет отталкиваться или притягиваться полем первого заряда. В свою очередь и первый заряд будет подвергаться механическому воздействию со стороны поля второго заряда.

Электрическое поле условно изображают в виде линий, направленных в каждой точке так же, как направлена в этой точке сила поля. Эти линии называются электрическими силовыми линиями. Таким образом, направление силы в какой-либо точке поля совпадает с направлением силовой линии, проходящей через эту точку.

Направление электрических силовых линий условились считать таким, чтобы оно совпадало с направлением силы,



Фиг. 5. Электрические поля одиночных зарядов.

Слева — электрические силовые линии направлены от положительного заряда, потому что другой (пробный) положительный электрический заряд, внесенный в поле этого заряда, стал бы от него отталкиваться Справа — электрические силовые линии направлены к отрицательному заряду, потому что пробный положительный заряд, внесенный в его поле, стал бы к нему притягиваться.

действующей на положительный заряд. Это именно направление силовых линий изображено на фиг. 5, где представлены электрические поля одиночных зарядов.

Таким образом, электрические силовые линии это — пути, по которым в электрическом поле стал бы перемещаться легкий точечный положительный заряд.

Для того, чтобы при помощи электрических силовых линий представить все свойства электрического поля и явления взаимодействия электрических зарядов, силовым линиям приписывают определенные свойства.

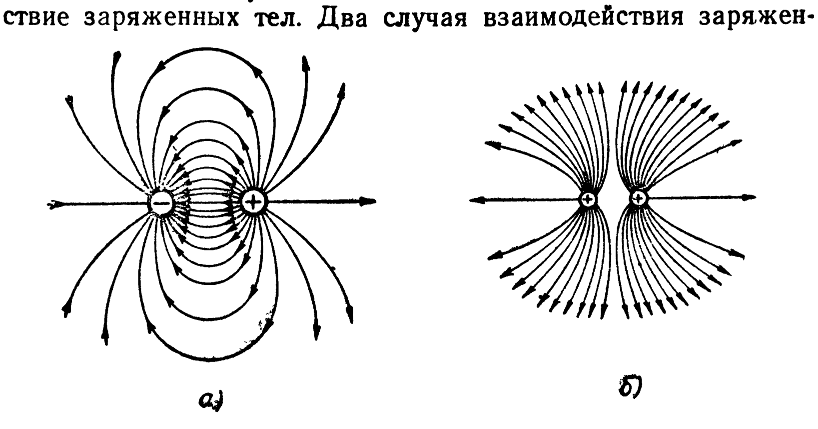
Первое свойство их состоит в том, что они всегда начинаются у положительного и оканчиваются у отрицательного заряда (фиг. 6,*а*). В воображаемом случае изолированного или, как говорят, уединенного заряда (фиг. 5) предполагается, что силовые линии оканчиваются (или начинаются) на бесконечно удаленных зарядах.

Второе свойство силовых линий заключается в том, что они входят и выходят перпендикулярно поверхности заряженных проводников.

Третье свойство — силовые линии, имеющие одинаковое направление, отталкиваются друг от друга.

И, наконец, четвертое свойство — силовые линии стремятся сократить свою длину (как растянутая резиновая нить).

Последними двумя свойствами и объясняется взаимодействие заряженных тел. Два случая взаимодействия заряженных тел приведены на фиг. 6. Учитывая третье и четвертое свойство силовых линий и глядя на фиг. 6, легко понять, почему в результате взаимодействия силовых линий в первом случае получается притяжение зарядов, а во втором отталкивание.



Фиг. 6. Объяснение взаимодействия электрических зарядов при помощи электрических силовых линий.

а — стремясь сократить свою длину, электрические силовые линии тянут разноименные заряды друг к другу; *б* — отталкиваясь друг от друга, электрические силовые линии одноименных зарядов стремятся раздвинуть эти заряды.

4. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Силу поля, или точнее его **напряженность**, оценивают по его действию на единичный заряд электричества. Так как одно и то же поле будет действовать на положительный заряд в одном направлении (например, отталкивать его), а на отрицательный — в другом (притягивать), то условились за направление напряженности поля принимать направление действия сил поля на положительный единичный заряд.

Напряженности поля соответствует густота силовых линий. Например, глядя на фиг. 5, мы видим, что поле имеет самую большую напряженность у поверхности заряженного тела. По мере удаления от заряженного тела густота силовых линий уменьшается, т. е. напряженность поля ослабевает. Теоретически поле уединенного заряда безгранично, хотя напряженность его быстро уменьшается по мере удаления от заряда.

Таким образом, силовые линии уединенного заряда должны простираться в бесконечность. Однако практически все силовые линии любого заряда всегда оканчиваются на каких-нибудь других предметах, заряженных электричеством противоположного знака.

Сравнивая электрическое поле уединенного заряда с полем земного тяготения, можно сказать, что напряженности электрического поля соответствует сила, действующая в поле земного тяготения на единицу массы (например на 1 *г*). Если такую частичку массы удалить от земли на большое расстояние, то вес ее (т. е. сила притяжения к земле) заметно уменьшится. Это значит, что «напряженность» поля земного тяготения также уменьшается по мере удаления от земли.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Поднимая груз на какую-либо высоту, мы совершаем работу. Количество совершаемой при этом работы определяется величиной груза и высотой, на которую он поднимается. Если мы будем поднимать всегда один и тот же груз, например 1 *г*, то количество работы будет определяться только высотой.

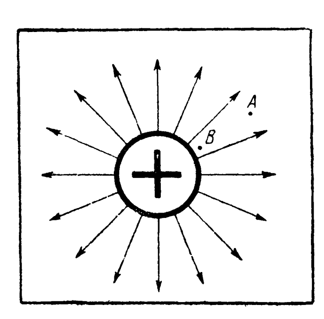
Работа, затраченная на поднятие груза, превращается в потенциальную энергию поднятого груза. Это значит, что она остается запасенной в поле земного тяготения и может быть вновь превращена в энергию движения, если поднятый на высоту груз предоставить самому себе. При падении груз совершит такое же количество работы, какое было затрачено на его поднятие Потенциальная энергия единичного груза определяется только высотой или уровнем над поверхностью земли

Представим себе, что мы из бесконечно далекой точки вносим в точку *А* (фиг. 7) поля большого положительного заряда другой положительный заряд, равный единице (единичный заряд). Так как одноименные заряды отталкиваются, то для перенесения единичного заряда в точку *А* нам придется затра-

тить некоторое количество энергии, т. е. совершить некоторую работу. Этой работой можно характеризовать свойства электрического поля в данной точке *А*.

Работа, которую нужно совершить для перемещения единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку поля, характеризует потенциал (электрический «уровень») данной точки поля.

Условлено, что в случае положительного заряда потенциал поля будет положителен и что в точках поля, расположенных вблизи заряда, он будет больше, чем в удаленных точках.



Фиг. 7. Потенциал электрического поля.

Чтобы измерить потенциал электрического поля в какой-либо точке (например, в точке *А*), нужно перенести в эту точку из бесконечности пробный положительный единичный заряд. Работа, совершенная при перенесении пробного заряда, и будет равна потенциалу поля в точке *А*.

Наоборот, в случае отрицательного заряда потенциал создаваемого им поля будет отрицателен, так как при внесении в это поле положительного заряда не придется совершать работы, а наоборот, работа будет получаться. Ясно, что в этом случае потенциал будет понижаться по мере приближения к заряду и повышаться при удалении от заряда.

После всего сказанного легко сообразить, что свободный положительный заряд, предоставленный самому себе, в электрическом поле всегда будет двигаться от точек с более высоким потенциалом к точкам с более низким потенциалом. При этом поле будет совершать работу.

Чтобы заставить положительный заряд двигаться от точек с низким потенциалом к точкам с более высоким потенциалом, нужно затрачивать работу. Наоборот, свободный отрицательный заряд, предоставленный самому себе, сам бы двигался от точек с низким потенциалом к точкам с более высоким потенциалом. А чтобы заставить отрицательный заряд двигаться к точкам с более низким потенциалом, нужно было бы затратить некоторую работу.

Движение положительного заряда «вниз» к точкам с более низким потенциалом имеет много общего с движением вниз тела в поле земного притяжения, т. е. к точкам с более низким уровнем, причем потенциал электрического поля аналогичен уровню в поле тяжести. Это и дает повод назвать электрический потенциал «электрическим уровнем».

Электрический потенциал данной точки мы условились определять по работе, совершаемой при перенесении единичного положительного заряда в эту точку из бесконечности. Однако, обычно мы имеем дело с перемещением зарядов не из бесконечности или в бесконечность, а между точками, находящимися на каком-то конечном расстоянии. Поэтому нам приходится пользоваться представлением о разности потенциалов между этими двумя точками. Точно так же, как при подъеме или опускании тела (фиг. 8), в конечном счете существенную роль играет разность уровней, на которую изменилась высота тела, а не высота самих уровней, так и при перенесении электрических зарядов играет роль не величина электрического потенциала, а разность потенциалов точек, между которыми перемещается заряд. Поэтому в дальнейшем мы всегда будем говорить не о потенциале, а о разности потенциалов. Разность потенциалов иначе называют напряжением.

Фиг. 8. Количество работы и разность уровней.

Количество работы зависит не от уровня, а от разности уровней. Уровни на фигурах слева и справа различны, а количество работы одинаково, потому что разность уровней на обеих фигурах одна и та же.

Для измерения электрического потенциала и разности электрических потенциалов (напряжения) введена специальная единица измерения, называемая вольтом. Например, говорят: разность потенциалов между точками A и B равна десяти вольтам.

Электрический потенциал и разность электрических потенциалов (напряжение) обозначается буквой U, а слово «вольт» — буквой *в*.

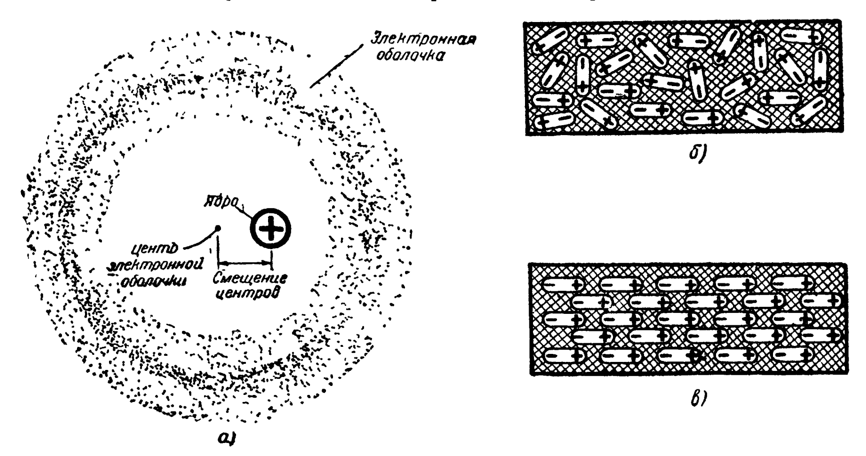
Для измерения больших напряжений применяется единица — киловольт, равная одной тысяче вольт. В формулах эта единица обозначается *кв*.

Иногда напряжения бывают столь малы, что для измерения их вольт оказывается слишком крупной единицей. В этих случаях применяется тысячная (милливольт) или миллионная доля вольта (микровольт). Милливольт обозначается буквами *мв*, а микровольт буквами *мкв*:

$$1 \text{ кв} = 1\,000 \text{ в},$$
$$1 \text{ в} = 1\,000 \text{ мв} = 1\,000\,000 \text{ мкв},$$
$$1 \text{ мв} = 1\,000 \text{ мкв}.$$

6. ДИЭЛЕКТРИКИ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ

Выше мы говорили, что вещества, у которых внешние электроны прочно связаны с ядром, называются диэлектриками. Внешние электроны в диэлектриках не отрываются от атома

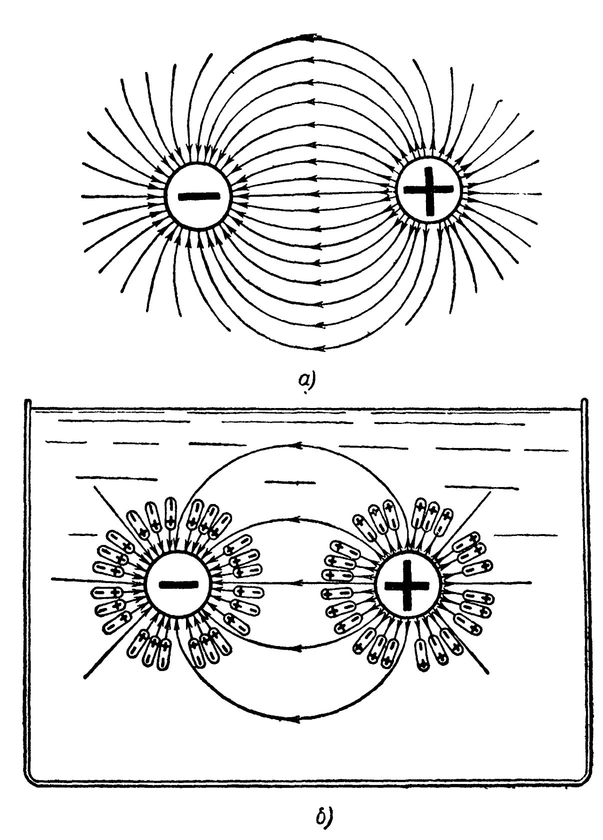


Фиг. 9. Поляризация диэлектрика.

а — Под влиянием внешнего электрического поля орбиты всех электронов смещаются в одну сторону и каждая молекула диэлектрика превращается в парный электрический заряд. *б* — Хаотическое расположение парных электрических зарядов в диэлектрике. *в* — Расположение парных зарядов при поляризации диэлектрика.

под воздействием электрических полей и поэтому диэлектрики не пропускают через себя электрический ток. По этой причине диэлектрики называют также изоляторами.

Однако, в молекулах диэлектриков под влиянием внешнего электрического поля происходит смещение положительно заряженных ядер в одну сторону, а электронных орбит — в другую (фиг. 9,*а*). При этом электроны молекул остаются связанными со своими ядрами. Такое состояние диэлектрика,



Фиг. 10. Уменьшение взаимодействия между электрическими зарядами вследствие влияния диэлектрика.

а — Поле между двумя электрическими зарядами, находящимися в роздухе. *б* — Поле между теми же зарядами, опущенными в дестиллированную воду. Число силовых линий между зарядами сильно уменьшилось, взаимодействие ослабло.

когда каждая молекула его превращается в парный заряд, называется поляризацией.

Существуют диэлектрики, у которых центр электронных орбит не совпадает с местом нахождения ядер и тогда, когда внешнее поле отсутствует. Однако, до тех пор, пока такие диэлектрики не помещены в электрическое поле, их нельзя считать поляризованными, так как парные заряды молекул не ориентированы каким-нибудь определенным образом, а расположены хаотически.

Условно такое расположение парных молекулярных зарядов показано на фиг. 9,*б*, где молекулы диэлектрика изображены в виде продолговатых палочек, а плюсы и минусы на них соответствуют положительным и отрицательным зарядам.

При помещении таких диэлектриков в электрическое поле их молекулы расположатся так, что все положительные заряды молекул окажутся обращенными в одну сторону, а отрицательные — в другую (фиг. 9,*в*). Кроме того, под влиянием внешнего поля происходит увеличение расстояния между центрами электронных орбит и ядрами молекул диэлектрика.

Таблица 1

Диэлектрические постоянные некоторых диэлектриков

Диэлектрик	Диэлектрическая постоянная
Воздух	1
Слюда	6—7,5
Стекло	5,5—8,0
Бумага пропарафиненная	3,4—3,7
Целлулоид	4—16
Вода дестиллированная	81,7

Очень сильное электрическое поле может даже разрушить диэлектрик. Это происходит при так называемом пробое диэлектрика. Молния, например, представляет собой пробой воздушного диэлектрика.

Между двумя электрическими зарядами, разделенными той или иной средой, взаимодействие происходит через данную среду. Вполне понятно поэтому, что свойства среды, находящейся между наэлектризованными телами, влияют на величину силы взаимодействия тел. Например, сила взаимодействия между двумя шариками, заряженными электричеством, уменьшится почти в 82 раза, если эти шарики погрузить в дестиллированную воду.

Уменьшение силы взаимодействия происходит вследствие поляризации воды. Парные заряды молекул воды, поляризуясь, располагаются таким образом, что у поверхности шарика, заряженного положительным электричеством, оказываются их отрицательные половинки, а у поверхности шарика, заряженного отрицательным электричеством, — положительные половинки (фиг. 10) В результате оба шарика как бы обволакиваются пленками зарядов противоположного знака, нейтрализующими собственные заряды шариков, так как большинство электрических силовых линий шариков перехватываются этими «пленками». Этим и объясняется уменьшение силы взаимодействия между шариками.

Число, показывающее, во сколько раз сила взаимодей-

ствия (притяжения или отталкивания) в данной среде меньше по сравнению с безвоздушной средой (ваккумом), называется диэлектрической постоянной данной среды. Диэлектрическая постоянная обозначается греческой буквой ε (эпсилон).

Диэлектрические постоянные наиболее употребительных диэлектриков приведены в табл. 1.

7. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В природе существует много веществ, имеющих кристаллическое строение, например обыкновенная поваренная соль, кварц, турмалин и др.

В кристалле молекулы располагаются не хаотически, а в определенном порядке, по так называемому закону «плотной симметричной укладки». Молекулы в кристаллах размещаются симметрично и таким образом, что между ними остается, по возможности, меньше пустых мест.

Поляризацию кристаллического диэлектрика можно вызвать не только при помощи электрического поля, но и путем сжатия или растяжения его кристаллов, т. е. путем механического изменения системы «укладки» молекул.

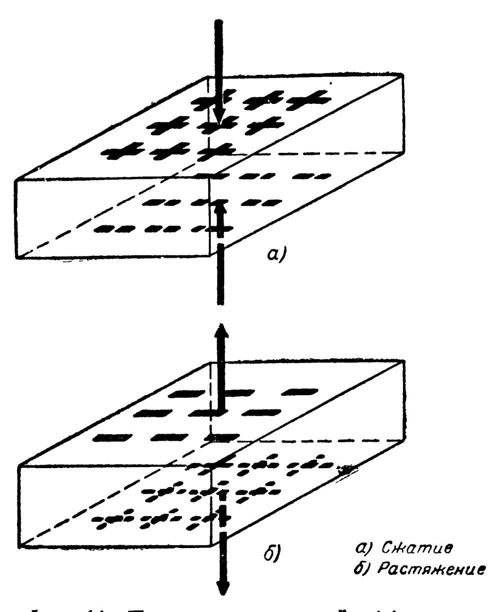
Возникновение поляризации кристалла в результате его сжатия или растяжения, называют пьезоэлектрическим эффектом.

При сжатии кристаллического диэлектрика, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, его молекулы перегруппировываются таким образом, что многие парные заряды оказываются ориентированными одинаково (как на фиг. 9,*в*). В результате на одной из поверхностей кристалла оказываются электрические заряды одного знака, а на другой — заряды противоположного знака. При растяжении кристалла знаки зарядов на поверхностях изменяются на обратные (фиг. 11).

Особенно сильно пьезоэлектрический эффект проявляется в кристаллах кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.

Замечательно то, что пьезоэлектрический эффект имеет и обратное действие, т. е. пластинки кварца, турмалина или сегнетовой соли под действием электрического поля сжимаются или растягиваются, в зависимости от направления поля. Это явление называется обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Обратный пьезоэлектрический эффект объясняется также изменением системы «укладки» молекул в диэлектрике под действием электрического поля.



Фиг. 11. Пьезоэлектрический эффект.

При сжатии кристалла кварца на одной из его поверхностей возникает положительный заряд, а на другой—отрицательный. При растяжении кристалла знаки зарядов на поверхностях меняются на обратные.

Пьезоэлектрический эффект используется в радиопередатчиках для стабилизации частоты электрических колебаний. Пластинка кварца строго определенных размеров играет в этом случае роль камертона, колеблясь с определенной частотой, обусловленной ее размерами. В такт с колебаниями кварцевой пластинки на ее поверхностях возникают переменные электрические заряды, которые и используются для управления частотой колебаний передатчика. На принципе пьезоэлектрического эффекта основано также устройство пьезоэлектрических адаптеров для проигрывания патефонных пластинок.

Обратный пьезоэлектрический эффект используется в пьезоэлектрических громкоговорителях и телефонах для превращения электрических колебаний в механические (звуковые).

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие между молекулами и атомами?
2. Чем отличаются друг от друга атомы различных элементов?
3 Как расположены электроны в атомах?
4. Какие электроны называют свободными?
5. Чем отличаются проводники от диэлектриков?
6. Что происходит с электронами при электризации тел?
7. В каком случае заряженные тела отталкиваются и в каком притягиваются?
8. Когда сильнее проявится взаимодействие заряженных тел, при малом расстоянии между ними или при большом?
9. Какие заряды сильнее взаимодействуют между собой, большие или малые?

10. Где находится энергия заряженного тела?
11. Что называется электрическим полем?
12. Как происходит взаимодействие заряженных тел на расстоянии?
13. Что такое электрические силовые линии?
14. Как определить направление электрических силовых линий в данной точке поля?
15. Каковы свойства электрических силовых линий?
16. Что такое напряженность электрического поля?
17. Что такое электрический потенциал?
18. Где потенциал выше, у поверхности тела, заряженного положительно, или у поверхности тела, заряженного отрицательно?
19. Что такое разность потенциалов?
20. Что такое напряжение?
21. Как называется единица, при помощи которой измеряют напряжение?
22. Почему диэлектрики называют изоляторами?
23. В чем суть явления поляризации диэлектриков?
24. Что происходит при пробое диэлектриков?
25. Что называется диэлектрической постоянной?
26. Что такое пьезоэлектрический эффект?
27. Что такое обратный пьезоэлектрический эффект?
28. Как используется в радиотехнике прямой и обратный пьезоэлектрический эффект?

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЕМКОСТЬ

9. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

При электризации диэлектрика заряжается только та часть его поверхности, которая подвергалась натиранию или соприкасалась с другим заряженным телом. Электрический заряд, возбужденный на части поверхности диэлектрика, не может распространиться по всей его поверхности, так как в диэлектриках все электрические заряды прочно связаны с молекулами вещества, лишенными свободы передвижения. Можно, например, зарядить один конец эбонитовой палочки отрицательным электричеством, а другой конец — положительным электричеством, и оба этих противоположных по знаку заряда не смогут соединиться друг с другом (фиг. 12).

Электрические заряды на проводниках ведут себя совершенно иначе. Если мы поместим на проводник некоторое количество электронов, они немедленно, отталкиваясь друг от друга, распространятся по всей поверхности проводника, причем именно по поверхности, а не по толще проводника.

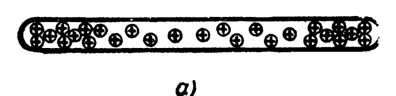
Если зарядить электричеством проводник удлиненной формы, например металлическую палочку, то наибольшее количество зарядов сосредоточится на ее концах (фиг. 13,*а*). При заряде металлического шара электрические заряды распределят-



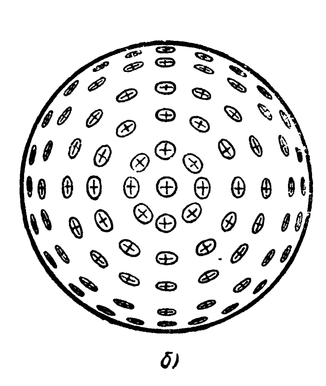
Фиг 12. Электрические заряды на диэлектрике.

Электрические заряды не могут передвигаться по поверхности диэлектрика. Поэтому положительные и отрицательные заряды, находящиеся на концах эбонитовой палочки, не могут соединиться.

ся по его поверхности равномерно (фиг. 13,*б*). Если этот шар будет пустотелым, то это нисколько не повлияет на распределение зарядов; они также равномерно «расселятся» по наружной поверхности шара, так как каждый из них будет стремиться уйти подальше от своих одноименных соседей — зарядов. Это в равной степени относится как к отрицательным зарядам, так и к положительным.



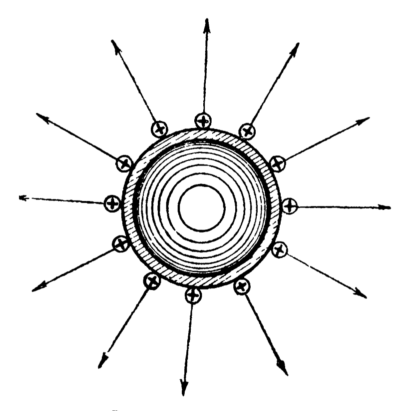
а)



б)

Фиг. 13. Распределение электрических зарядов на поверхности проводников.

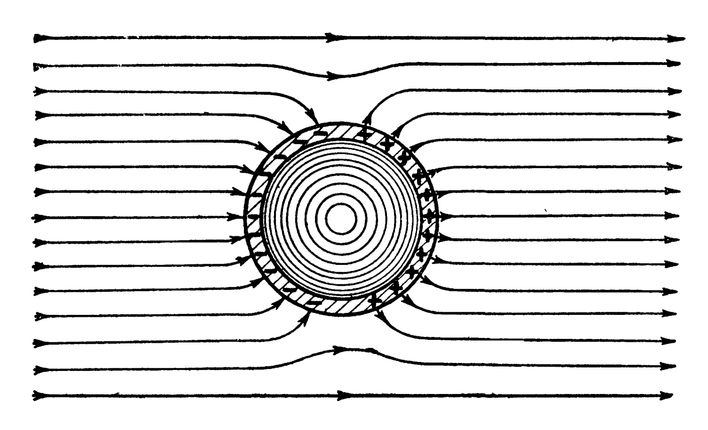
а — Электрические заряды, помещенные на металлическую палочку, распределяются по всей ее поверхности, но с большей плотностью на концах. *б* — Электрические заряды распределяются равномерно по всей поверхности металлического шара.



Фиг. 14. Электрическое поле пустотелого металлического шара.

Отталкиваясь друг от друга, электрические заряды стремятся занять наибольшую поверхность. Поэтому все заряды оказываются расположенными только на внешней поверхности полого шара. На его внутренней поверхности зарядов нет. По этой причине электрическое поле внутри полого металлического шара отсутствует.

В связи с тем, что на внутренней поверхности полого заряженного металлического шара электрические заряды отсутствуют, а на внешней поверхности они распределены равномерно, внутри такого шара не будет электрического поля (фиг. 14). Электрического поля внутри пустотелого металлического шара не будет и в том случае, если он находится в электрическом поле другого заряда (фиг. 15). Этим свойством пользуются в радиотехнике, когда хотят защитить тот или иной прибор от влияния внешних электрических полей. Защищаемый прибор помещают в металлический футляр, называемый экраном, который и перехватывает все силовые линии внешних электрических полей.



Фиг. 15. Принцип экранирования от внешних электрических полей.

Электрические силовые линии внешнего поля не могут проникнуть внутрь пустотелого металлического шара, так как они оканчиваются на свободных электрических зарядах на внешней поверхности шара.

Свободные электрические заряды, помещенные в каком-либо месте на проводнике, расходятся по его поверхности подобно воде, растекающейся, например, по дну какого-либо сосуда. Подобно тому, как вода будет растекаться по дну сосуда до тех пор, пока уровень ее не сделается всюду одинаковым, так и электрические заряды будут «растекаться» по поверхности проводника до тех пор, пока электрический потенциал всех точек поверхности не станет одинаковым. Практически этот процесс происходит мгновенно.

Легко сообразить, что потенциал положительно заряженного проводника будет тем выше, чем больше заряд, сообщен-

ный проводнику. Это видно хотя бы из такого рассуждения. Представим себе, что мы заряжаем положительным электричеством какой-либо уединенный металлический предмет (проводник), перенося на его поверхность один за другим отдельные электрические заряды. По мере накопления на нем электричества на перенесение новых зарядов придется затрачивать все больше и больше работы, так как при переносе каждого следующего заряда нам придется преодолевать силы отталкивания, действующие со стороны всех предыдущих зарядов, помещенных ранее на проводник. А так как потенциал проводника характеризуется работой, затраченной на перенесение единичного положительного заряда из бесконечно удаленной точки в какую-либо точку проводника, то с увеличением положительного заряда проводника потенциал его будет повышаться (ясно, что потенциал проводника, заряженного отрицательным зарядом, будет отрицателен и с увеличением заряда будет понижаться).

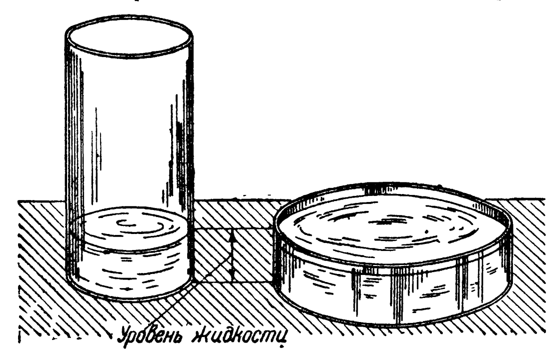
Количественная связь между величиной заряда проводника и его потенциалом очень проста: потенциал проводника прямо пропорционален величине его заряда, т. е. при увеличении заряда проводника, например, вдвое потенциал его повышается также вдвое.

Однако, соотношение между зарядом и потенциалом различно для разных проводников. Например, один проводник достаточно зарядить количеством электричества в одну миллиардную долю кулона, чтобы довести его потенциал до одного вольта, а другому проводнику для этого потребуется заряд, например, в одну стомиллионную долю кулона. Следовательно, для разных проводников нужны разные количества электричества, чтобы довести их заряд до одного и того же «электрического уровня». Поэтому принято считать, что различные проводники обладают различной электрической емкостью.

Емкость проводника зависит прежде всего от его размеров, — чем больше размеры проводника, тем больше его емкость. Емкость проводника зависит и от других причин, о которых мы еще будем говорить. За единицу электрической емкости принимают емкость такого проводника, которому надо сообщить заряд, равный единице количества электричества — одному кулону, чтобы потенциал его повысился также на одну единицу, т. е. на 1 *в*.

Поскольку мы сравнивали электрический потенциал с уровнем жидкости в сосуде, можно попытаться и далее искать аналогию между емкостью проводника и свойствами сосуда.

Однако, электрическую емкость нельзя отождествлять с емкостью (вместимостью) сосуда. Действительно, емкость сосуда указывает, какое наибольшее количество жидкости он может вместить, между тем как электрическая емкость проводника ничего не говорит о том, какое количество электричества может «вместить» проводник. Всякий проводник принципиально может вместить любое количество электричества, только с увеличением количества электричества будет повышаться потенциал (электрический уровень) проводника и повышаться тем быстрее, чем меньше емкость проводника.



Фиг. 16. Отличие электрической емкости от обычного понятия емкости.

С обычной точки зрения емкость обоих сосудов одинакова, так как в них может поместиться одинаковое количество жидкости. С „электрической" же точки зрения их емкость различна, так как для получения того же уровня в них придется налить разное количество жидкости.

Поэтому электрическую емкость проводника можно было бы сравнить с площадью дна сосуда (мы считаем, что сосуд имеет вертикальные стенки) Действительно, чем больше площадь дна сосуда, тем больше нужно налить в него жидкости для того, чтобы она достигла определенного уровня (фиг. 16).

Если же все-таки пытаться сравнить емкость проводника с емкостью сосуда, то можно сравнивать емкость проводника с емкостью закрытого сосуда, наполняемого газом.

В данный сосуд может быть, вообще говоря, помещено самое различное весовое количество воздуха, но при этом и давление внутри сосуда в каждом случае будет иным. Отношение же весового количества воздуха к давлению будет величиной неизменной. Поясним это примером. Предположим, что при давлении в одну атмосферу в сосуде уместилось количе-

ство воздуха, равное 5 *г*. Следовательно, емкость сосуда равна 5 единицам. Если теперь мы увеличим давление, например, в 6 раз, то сможем поместить в сосуд в 6 раз больше воздуха, т. е. 30 *г*. Но емкость сосуда, так, как мы ее определили, при этом не изменилась, ибо отношение количества воздуха к давлению ($\frac{30}{6}=5$) осталось неизменным.

Итак, электрическую емкость уединенного проводника мы определим как отношение количества электричества, сообщенного проводнику, к потенциалу, который при этом приобретает проводник, т. е.

$$C=\frac{Q}{U}. \qquad (1)$$

Если Q выражено в кулонах, а U в вольтах, то емкость C получится в фарадах (обозначение *ф*).

Фарада представляет собой слишком крупную величину, никогда не встречающуюся на практике. Поэтому для измерения емкости приняты более мелкие единицы — микрофарада (*мкф*), микромикрофарада (*мкмкф*) и сантиметр (*см*).

Микрофарада составляет одну миллионную долю фарады, а микромикрофарада (или пикофарада) — одну миллионную долю микрофарады. Сантиметр же составляет одну девятисоттысячную долю микрофарады. Чтобы дать читателю представление о последней единице, укажем, что емкостью в 1 *см* обладает уединенный металлический шар, радиус которого равен 1 *см*:

$$1\ ф=1\,000\,000\ мкф=1\,000\,000\,000\,000\ мкмкф,$$
$$1\ мкф=1\,000\,000\ мкмкф=900\,000\ см,$$
$$1\ мкмкф=0{,}9\ см.$$

Пример 1. На уединенном металлическом шаре расположен электрический заряд, равный 0,0000001 *к*. Потенциал шара равен 10 000 *в*.
Какова электрическая емкость шара?

Решение:

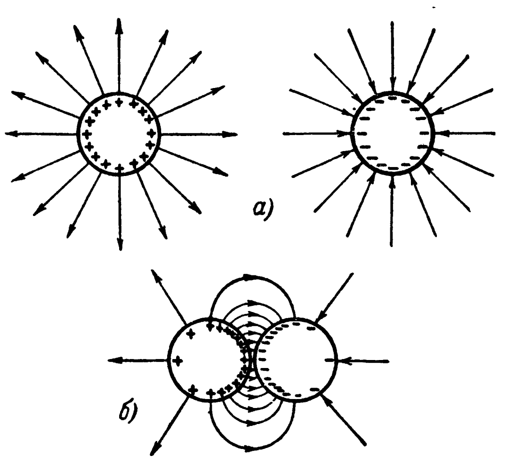
1) $Q=0{,}0000001$ *к*; $U=10\,000$ *в*.

2) $C=\frac{Q}{U}=\frac{0{,}0000001}{10\,000}=0{,}00000000001\ ф=0{,}00001\ мкф=10\ мкмкф=$
$=9\ см,$

10. КОНДЕНСАТОРЫ

Емкость проводников, удаленных от других предметов (уединенных проводников), зависит от размеров и формы самих проводников. Чем больше размеры проводника, тем больше его емкость.

Но в практике нам не приходится иметь дело с уединенными проводниками. Поэтому важно знать, как влияют на емкость расположенные вблизи данного проводника предметы и в частности другие проводники.



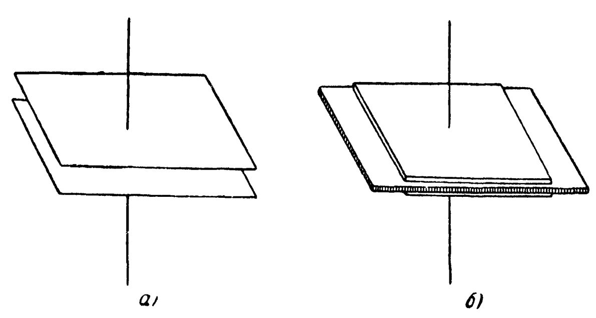
Фиг. 17. Повышение емкости вследствие взаимного влияния.

а – Заряженные металлические шары находятся на большом расстоянии друг от друга. Заряды на их поверхностях распределены равномерно. Емкость шаров зависит только от их размеров. *б* – Шары сближены. Заряды на поверхностях распределены неравномерно. Большая часть силовых линий сосредоточена в промежутке между шарами, а не уходит в окружающее пространство, поэтому поле вокруг каждого из шаров стало слабее. Разность потенциалов между шарами также уменьшилась.

Представим себе два металлических шара одинаковых размеров, заряженных одинаковыми количествами электричества разного знака и удаленных один от другого на значительное расстояние (фиг. 17,*а*). Заряды на обоих шарах будут расположены равномерно по их поверхностям вследствие того, что одноименные заряды на каждом из шаров отталкиваются друг от друга. Потенциал каждого из шаров будет определяться его размерами и тем количеством электричества, которое ему сообщено. Потенциал одного шара будет положителен, другого — отрицателен, так что между шарами будет существовать некоторая разность потенциалов.

Приблизим шары друг к другу (фиг. 17,*б*). Разноименные заряды шаров станут притягиваться друг к другу. Вследствие этого они окажутся распределенными уже не равномерно по поверхностям шаров, а частично переместятся на те стороны их, которыми они обращены друг к другу. Большинство линий сил, выходящих из положительных зарядов первого шара, бу-

дет оканчиваться на отрицательных зарядах второго шара. При этом потенциал каждого шара будет определяться не только зарядом, находящимся на нем, но и зарядом соседнего шара. Так как заряды обоих шаров разноименные, то потенциал положительно заряженного шара будет понижен вследствие влияния второго шара, заряженного отрицательно и создающего в окружающем пространстве отрицательный потенциал. Наоборот, потенциал второго шара будет повышен вследствие влияния первого шара, создающего в окружающем пространстве положительный потенциал.



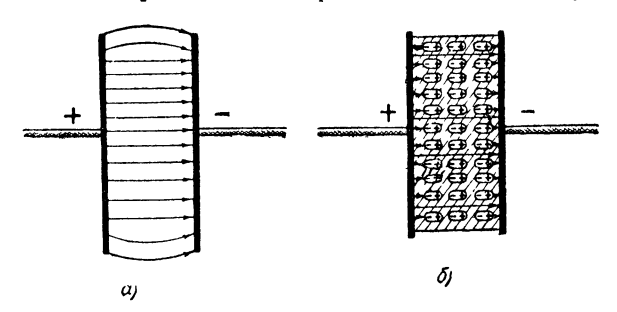
Фиг. 18. Простейший конденсатор.

Простейший конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин. *а* — с воздушным диэлектриком; *б* — с твердым диэлектриком.

Таким образом, по сравнению с тем, что было до сближения шаров, потенциал положительно заряженного шара понизится, а отрицательно заряженного шара повысится и разность потенциалов между шарами уменьшится. Следовательно, при сближении заряженных проводников, если заряд их остался неизменным, разность потенциалов понижается. Но при той же разности потенциалов проводники могут «вместить» большие количества электричества. Значит, при сближении проводников их емкость увеличивается.

Емкость проводников зависит не только от расстояния между ними и от их размеров и формы, но и от свойств окружающей среды. Приборы, в которых емкость между проводниками используется для накопления электрических зарядов, носят название конденсаторов. В самом простейшем виде конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин, разделенных слоем воздуха (фиг. 18,*а*). Емкость такого конденсатора будет тем больше, чем больше поверхность пластин и чем меньше расстояние между ними.

Часто для увеличения емкости конденсатора между его пластинами помещают какой-либо диэлектрик (фиг. 18,*б*). Увеличение емкости в этом случае объясняется тем, что при заряде конденсатора на поверхностях диэлектрика, расположенных против пластин, появляются электрические заряды, знак которых противоположен знаку зарядов пластин (фиг. 19). Эти заряды диэлектрика, взаимодействуя с зарядами конденсатора, уменьшают разность потенциалов между ними при неизменной величине зарядов на обкладках, т. е. увеличивают емкость конденсатора.



Фиг. 19. Увеличение емкости конденсатора в результате поляризации диэлектрика.

а — В воздушном конденсаторе все электрические силовые линии, выходящие из одной пластины, оканчиваются на противоположной пластине. *б* — В конденсаторе с твердым диэлектриком большинство силовых линий перехватывается парными зарядами диэлектрика, пластины как бы становятся ближе друг к другу, поэтому разность потенциалов между ними уменьшается, а емкость конденсатора увеличивается.

Вносимые различными диэлектриками изменения емкости конденсаторов связаны с их диэлектрическими постоянными. Чем больше диэлектрическая постоянная данного диэлектрика, тем более он увеличивает емкость конденсатора.

Емкость плоского конденсатора, состоящего из двух пластин, при условии, что расстояние между пластинами мало по сравнению с размерами пластин, определяется по формуле

$$C = 0{,}09 \cdot \frac{S\varepsilon}{d}, \qquad (2)$$

где C — емкость конденсатора в *мкмкф*;

S — активная площадь одной пластины в *см²*;

ε — диэлектрическая постоянная диэлектрика, разделяющего пластины;

d — расстояние между пластинами или, что то же самое, толщина диэлектрика в *см*.

Пример 2. Какова емкость конденсатора, состоящего из двух пластин размером по 10 *см*², разделенных стеклянным диэлектриком толщиной в 1 *мм* (диэлектрическая постоянная стекла $\varepsilon = 7$)?

Решение:

1) $S = 10$ *см*²; $\varepsilon = 7$; $d = 0,1$ *см*; $C = ?$

2) $C = 0,09 \frac{S\varepsilon}{d} = 0,09 \frac{10 \cdot 7}{0,1} = 63$ *мкмкф*.

11. ЭНЕРГИЯ ПОЛЯ КОНДЕНСАТОРА

Вся энергия заряженного конденсатора сосредотачивается в электрическом поле между его пластинами. Энергию, накопленную в конденсаторе, можно определить следующим образом. Представим себе, что мы заряжаем конденсатор не сразу, а постепенно, перенося электрические заряды с одной его пластины на другую.

При перенесении первого заряда работа, произведенная нами, будет небольшой. На перенесение второго заряда мы затратим больше энергии, так как в результате перенесения первого заряда между пластинами конденсатора будет уже существовать разность потенциалов, которую нам придется преодолевать. Третий, четвертый и вообще каждый последующий заряд будет переносить все труднее и труднее, т. е. на перенесение их придется затрачивать все больше и больше энергии. Пусть мы перенесем таким образом некоторое количество электричества, которое мы обозначим буквой Q.

Вся энергия, затраченная нами при заряде конденсатора, сосредоточится в электрическом поле между его пластинами. Напряжение между пластинами конденсатора в конце заряда мы обозначим буквой U.

Как мы уже заметили, разность потенциалов в процессе заряда не остается постоянной, а постепенно увеличивается от нуля — в начале заряда — до своего конечного значения U.

Для упрощения вычисления энергии допустим, что мы перенесли весь электрический заряд Q с одной пластины конденсатора на другую не маленькими порциями, а сразу. Но при этом мы должны считать, что напряжение между пластинами конденсатора было не нуль, как в начале заряда, и не U, как в конце заряда, а равнялось среднему значению между нулем и U, т. е. половине U. Таким образом, энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, будет равна половине напряжения U, умноженной на общее количество перенесенного электричества Q.

Полученный результат мы можем записать в виде следующей математической формулы:

$$A = \frac{1}{2} UQ. \qquad (3)$$

Если напряжение в этой формуле будет выражено в вольтах, а количество электричества — в кулонах, то энергия A получится в джоулях. Если мы вспомним, что заряд, накопленный на конденсаторе, равен $Q = CU$ [это следует из формулы (1) в предыдущем параграфе], то формулу (3) можно будет записать окончательно в следующем виде:

$$A = \frac{CU^2}{2}. \qquad (3а)$$

Выражение (3а) говорит нам о том, что энергия, сосредоточенная в поле конденсатора, равна половине произведения емкости конденсатора на квадрат напряжения между его пластинами.

Этот вывод имеет очень важное значение при изучении раздела радиотехники о колебательных контурах.

12. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

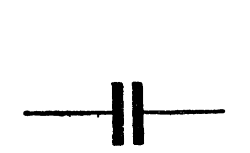
На электрических и радиотехнических схемах конденсаторы условно изображаются в виде двух параллельных линий, представляющих схематически две системы пластин конденсатора (фиг. 20).

Конденсаторы могут включаться в электрические цепи различными способами.

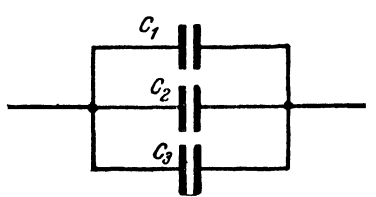
Если группа конденсаторов включена в цепь таким образом, что к точкам включения непосредственно присоединены пластины всех конденсаторов, то такое соединение называется параллельным (фиг. 21). Если же конденсаторы соединены между собой цепочкой и к точкам включения в цепь непосредственно присоединены пластины только первого и последнего конденсаторов, то такое соединение называется последовательным (фиг. 22).

При заряде группы конденсаторов, соединенных параллельно (фиг. 21), между пластинами всех конденсаторов будет одна и та же разность потенциалов, так как все они заряжа-

ются от одного и того же источника тока. Общее же количество электричества на всех конденсаторах будет равно сумме количеств электричества, помещающихся на каждом из конденсаторов, так как заряд каждого их конденсаторов происходит независимо от заряда других конденсаторов данной



Фиг. 20. Условное обозначение конденсатора на радиотехнических схемах.



Фиг. 21. Параллельное соединение конденсаторов.

При параллельном соединении общая емкость равна сумме емкостей всех соединенных конденсаторов.

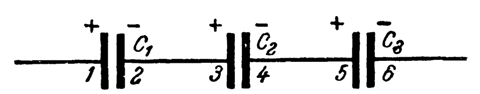
группы. Исходя из этого, всю систему параллельно соединенных конденсаторов можно рассматривать как один эквивалентный (равноценный) конденсатор, емкость которого равна сумме емкостей всех соединенных конденсаторов.

Обозначим суммарную емкость группы конденсаторов буквой C, емкость первого конденсатора C_1, емкость второго C_2 и емкость третьего C_3. Тогда для параллельного соединения будет справедливо равенство:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (4)$$

Последний знак + и многоточие указывают на то, что этой формулой можно пользоваться при четырех, пяти и вообще при любом числе конденсаторов.

При последовательном соединении (фиг. 22) все конденсаторы заряжаются одинаковым количеством электричества, так как непосредственно от источника тока заряжаются только крайние пластины (*1* и *6*), а остальные пластины (*2, 3, 4* и *5*) заряжаются через влияние. При этом заряд пластины *2* будет равен по величине и противоположен по знаку заряду пластины *1*, заряд пластины *3* будет ра-



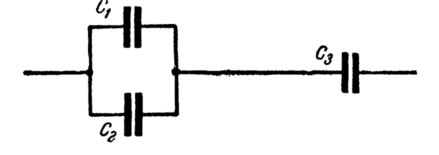
Фиг. 22. Последовательное соединение конденсаторов.

При последовательном соединении общая емкость меньше емкости самого маленького из соединенных конденсаторов. При последовательном соединении конденсаторов с одинаковыми емкостями общая емкость будет во столько раз меньше емкости одного конденсатора, сколько соединено конденсаторов.

вен по величине и противоположен по знаку заряду пластины 2 и т. д.

Напряжения на различных конденсаторах будут, вообще говоря, различными, так как для заряда одним и тем же количеством электричества конденсаторов различной емкости всегда требуются различные напряжения. Чем меньше емкость конденсатора, тем большее напряжение необходимо для того, чтобы зарядить этот конденсатор требуемым количеством электричества, и наоборот. Таким образом, при заряде группы конденсаторов, соединенных последовательно, на конденсаторах малой емкости напряжения будут больше, а на конденсаторах большой емкости — меньше.

Фиг. 23. Последовательное соединение двух конденсаторов.



Фиг. 24. Смешанное соединение конденсаторов.

При смешанном соединении вычисляют сначала емкость конденсаторов, соединенных параллельно, а затем—емкость всей группы.

Аналогично предыдущему случаю можно рассматривать всю группу конденсаторов, соединенных последовательно, как один эквивалентный конденсатор, между пластинами которого существует напряжение, равное сумме напряжений на всех конденсаторах группы, а заряд которого равен заряду любого из конденсаторов группы.

Возьмем самый маленький конденсатор в группе. На нем должно быть самое большое напряжение. Но напряжение на этом конденсаторе составляет только часть общего напряжения, существующего на всей группе конденсаторов. Напряжение на всей группе больше напряжения на конденсаторе, имеющем самую малую емкость. А отсюда непосредственно следует, что общая емкость группы конденсаторов, соединенных последовательно, меньше емкости самого малого конденсатора в группе.

Для вычисления общей емкости при последовательном соединении конденсаторов удобнее всего пользоваться следующей формулой:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots}. \qquad (5)$$

Обозначения в этой формуле те же, что и в формуле (4).

Для частного случая двух последовательно соединенных конденсаторов (фиг. 23) формула (5) может быть видоизменена следующим образом:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{1}{\frac{C_2 + C_1}{C_2 \cdot C_1}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (5a)$$

При смешанном соединении, в случае, изображенном на фиг. 24, вначале вычисляют емкость параллельно соединенных конденсаторов (C_1 и C_2), а затем, рассматривая эту вычисленную емкость, как последовательно соединенную с конденсатором C_3, вычисляют по формуле (5а) общую емкость всей системы.

Пример 3. Вычислить общую емкость трех конденсаторов $C_1 = 10$ *мкмкф*, $C_2 = 40$ *мкмкф* и $C_3 = 50$ *мкмкф*, соединенных параллельно:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 10 + 40 + 50 = 100 \text{ мкмкф}.$$

Пример 4. Вычислить общую емкость трех конденсаторов $C_1 = 10$ *мкмкф*, $C_2 = 40$ *мкмкф* и $C_3 = 50$ *мкмкф*, соединенных последовательно.

Решение:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{40} + \frac{1}{50}} = 7 \text{ мкмкф}.$$

Пример 5. Вычислить общую емкость двух конденсаторов $C_1 = 10$ *мкмкф* и $C_2 = 40$ *мкмкф*, соединенных последовательно.

Решение:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{10 \cdot 40}{10 + 40} = 8 \text{ мкмкф}.$$

Пример 6. Вычислить общую емкость трех смешанно соединенных конденсаторов, включенных так, как изображено на фиг. 24, если $C_1 = 10$ *мкмкф*, $C_2 = 40$ *мкмкф* и $C_3 = 50$ *мкмкф*.

Решение:

1) $C_{1,2} = C_1 + C_2 = 10 + 40 = 50$ *мкмкф*;

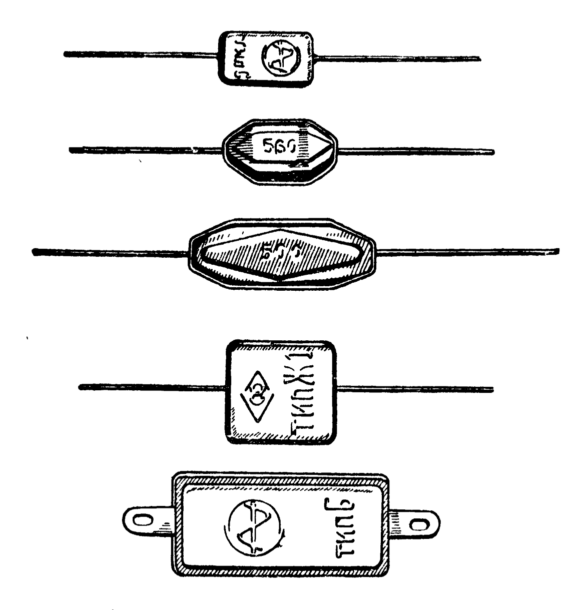
2) $C = \frac{C_{1,2} \cdot C_3}{C_{1,2} + C_3} = \frac{50 \cdot 50}{50 + 50} = 25$ *мкмкф*.

13. ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсаторы, применяемые в радиотехнике, делятся на две основные группы: первая — конденсаторы с неизменяемой (постоянной) емкостью; вторая — конденсаторы, емкость которых можно изменять по желанию в некоторых пределах.

Первые называются конденсаторами постоянной емкости, а вторые — конденсаторами переменной емкости.

Пластины (обкладки) конденсаторов постоянной емкости обычно изготовляются из фольги или красной меди; в качестве



Фиг. 25. Слюдяные конденсаторы постоянной емкости, применяемые в радиотехнике.

же диэлектриков употребляется слюда, пропарафиненная бумага или фарфор.

Конструктивно конденсаторы постоянной емкости от 10 до 50 000 *мкмкф* выполняются в виде нескольких тонких фольговых или медных пластинок размером от 0,5 до 10 *см*^{2}, разделенных листочками слюды. Пластины и слюдяные прокладки собираются в одну стопку, причем каждая группа обкладок соединяется между собой. На собранную стопку накладывается металлическая обойма, и весь конденсатор запрессовывается в пластмассу.

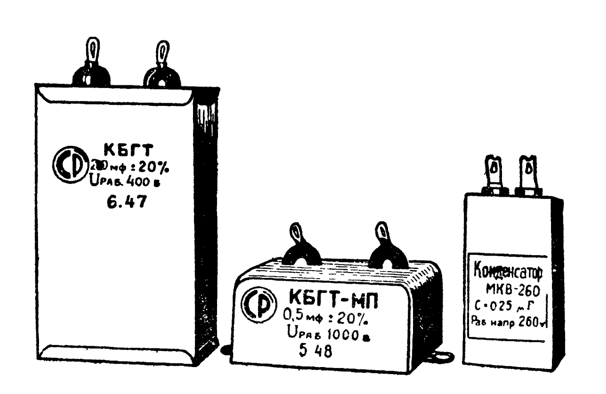
Различные типы слюдяных конденсаторов постоянной емкости изображены на фиг. 25.

Емкость таких конденсаторов подсчитывается по следующей формуле:

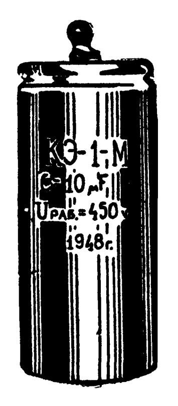
$$C = 0{,}09 \frac{S(n-1)\varepsilon}{d}, \qquad (6)$$

в которой C, S и ε уже известные нам величины (см. стр. 20), а n—число всех металлических пластинок.

Другой тип конденсатора постоянной емкости имеет в качестве диэлектрика пропарафиненную бумагу. Он применяется для емкостей от 500 *мкмкф* до 10 *мкф*. Конденсатор состоит из длинных полос фольги с проложенными между ними полосами пропарафиненной бумаги. Эти полосы свертываются в трубочку и вкладываются в металлическую коробку или гильзу. Наружу выводятся металлические лепестки или проволочки, соединенные с обеими станиолевыми полосами.



Фиг. 26. Бумажные конденсаторы постоянной емкости.



Фиг. 27. Электролитический конденсатор.

Внешний вид таких конденсаторов изображен на фиг. 26.

Третий тип конденсаторов постоянной емкости — это керамические конденсаторы. Такие конденсаторы изготовляются на емкости от 1 до 1 000 *мкмкф*. Конструкция их довольно сложна. Они состоят из нескольких тонких керамических трубочек, внешняя и внутренняя поверхность которых металлизирована. Металлизированные поверхности трубочек образуют обкладки, а сами керамические трубочки являются диэлектриком.

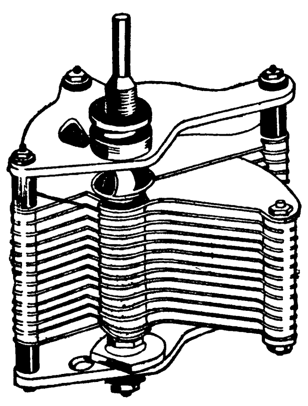
Наконец, четвертым типом постоянных конденсаторов являются так называемые электролитические конденсаторы.

Электролитический конденсатор представляет собой две алюминиевые ленты, скатанные в рулон, между витками которого проложена фильтровальная бумага, пропитанная электролитом. Весь конденсатор заключен в алюминиевый стакан, или в картонную гильзу (фиг. 27).

При подаче постоянного напряжения на поверхности алюминиевой пластины образуется пленка окиси алюминия, являющаяся диэлектриком. Так как эта пленка очень тонка, то емкость конденсатора получается очень большой.

Электролитические конденсаторы употребляются в выпрямительных установках для сглаживания пульсации выпрямленного тока, а также в различных участках радиоприемных схем.

Конденсаторы переменной емкости состоят обычно из двух систем жестких металлических пластин, диэлектриком между которыми служит воздух. Одна система пластин укрепляется неподвижно (статор), а другая — на вращающейся оси (ротор) (фиг. 28). Вращая ось, можно вводить в промежуток между неподвижными пластинами больший или меньший сектор подвижных пластин. При выведенных подвижных пластинах конденсатор имеет наименьшую емкость, а при введенных — наибольшую.



Фиг. 28. Конденсатор переменной емкости.

14. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему электрические заряды, помещенные на диэлектрик, не рассредоточиваются по всей его поверхности?
2. Почему при заряде электричеством пустотелого металлического шара внутри этого шара не создается электрическое поле?
3. Почему все точки поверхности заряженного проводника имеют одинаковый потенциал?
4. Как зависит потенциал проводника от величины электрического заряда на нем?
5. Что такое электрическая емкость?
6. Как зависит электрическая емкость от размеров проводника?
7. Какими мерами измеряют электрическую емкость?
8. Что происходит с емкостью проводников при их сближении?
9. Для чего служит конденсатор?
10. Как устроен простейший конденсатор?
11. Для чего между пластинами конденсатора помещают диэлектрик?
12. Как можно подсчитать емкость плоского конденсатора?

13. Как определить количество энергии, находящейся в поле заряженного конденсатора?

14. В чем состоит способ параллельного соединения конденсаторов?

15. Чему равна общая емкость нескольких конденсаторов, соединенных параллельно?

16. В чем состоит способ последовательного соединения конденсаторов?

17. Как подсчитать емкость группы конденсаторов, соединенных последовательно?

18. Как подсчитать емкость двух конденсаторов, соединенных последовательно?

19. Как вычисляется емкость группы конденсаторов при смешанном соединении?

20. В чем состоит разница между конденсаторами постоянной и переменной емкости?

21. Как можно подсчитать емкость конденсатора?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

15. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК — ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Электрический ток дает знать о себе одним из следующих внешних проявлений.

Протекая через проводник, электрический ток нагревает его. Например, спираль электрической плитки нагревается докрасна при протекании по ней электрического тока.

Ток, протекающий по виткам проволочной катушки, сообщает ей магнитные свойства, очень похожие на свойства обычного магнита.

Протекая через жидкость, ток совершает химическое действие, например, разлагает воду на ее составные части — водород и кислород.

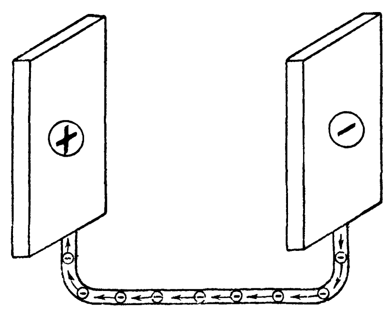
При прохождении тока через газ последний начинает светиться, примером чего могут служить газосветные неоновые и аргоновые трубки, употребляемые для светящихся рекламных надписей и рисунков.

Наконец, прикоснувшись к проводнику с током, мы получаем ощутительный удар, не требующий пояснений.

Электрический ток в металлических проводниках представляет собой движение электронов. Свободные электроны в проводниках находятся все время в состоянии хаотического (беспорядочного) движения. Они движутся в междумолекулярном пространстве проводника в различных направлениях и с различными скоростями, беспрерывно сталкиваются с мо-

лекулами проводника, выбивают из них новые электроны, занимают сами их место и т. д.

Возьмем две металлические пластины (фиг. 29). Зарядим одну из них положительно (недостаток электронов), а другую — отрицательно (избыток электронов). Потенциал первой пластины будет положительным, а потенциал второй пластины — отрицательным, т. е. между пластинами возникает разность потенциалов. Соединим теперь пластины между собой медной проволокой (проводником). Свободные электроны устремятся с правой пластины на левую по соединительному проводнику. К беспорядочному движению электронов прибавится еще упорядоченное движение их в определенном направлении (справа налево).



Фиг. 29. Электрический ток—движение электронов.

Электроны по соединительному проводнику устремляются с правой пластины на левую. Движение электронов продолжается до тех пор, пока на обеих пластинах их количество не станет одинаковым.

Движение электронов в проводнике будет походить на движение роя комаров, гонимого ветром. Внутри самого роя комары беспорядочно движутся во всех направлениях, но вместе с тем весь рой, как целое, перемещается по ветру.

Электроны являются «крупинками» электричества; поэтому движение электронов по проводнику есть не что иное, как электрический ток.

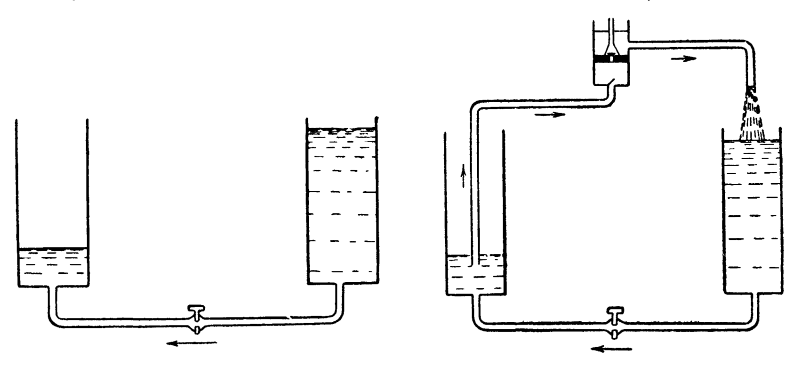
16. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ

В приведенном выше примере движение электронов в проводнике, соединяющем две заряженные металлические пластины, не может быть продолжительным. Действительно, число электронов на положительной пластине будет возрастать, а на отрицательной убывать. В конце концов количество электронов на обеих пластинах уравняется и пластины приобретут одинаковый потенциал. Тогда и ток в проводнике прекратится.

Итак, *необходимым условием для протекания электрического тока по проводнику является наличие разности потенциалов (напряжения) между его началом и концом.*

Для пояснения можно привести следующий пример. Представим себе два сосуда, соединенных трубкой и наполненных

водой, причем уровни воды в сосудах различны (фиг. 30). При открытии крана вода по трубке, соединяющей сосуды, устремится из сосуда с более высоким уровнем (потенциалом) в сосуд с более низким уровнем (потенциалом). Движение



Фиг. 30. **Течение воды из сосуда с высоким уровнем в сосуд с низким уровнем аналогично электрическому току от высшего потенциала к низшему.**

Фиг. 31. **Течение воды поддерживается непрерывной работой насоса. Вода циркулирует по замкнутому пути, как электрический ток в замкнутой электрической цепи.**

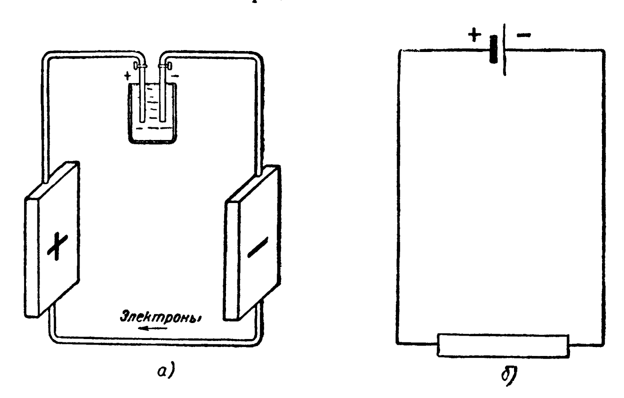
(ток) воды прекратится, как только уровень воды в обоих сосудах сделается одинаковым, т. е. исчезнет разность уровней (разность потенциалов). Необходимым условием для движения воды в трубке является наличие разности уровней воды в сосудах или, проще говоря, напора воды (напряжения).

Если мы будем при помощи насоса все время поддерживать разность уровней воды в сосудах (фиг. 31), то по трубке, соединяющей сосуды, будет двигаться непрекращающийся поток воды. Вода будет беспрерывно циркулировать по этому замкнутому пути. При этом насос будет совершать работу по подъему воды от точки с низким уровнем к точке с высоким уровнем.

Совершенно подобным образом при помощи какого-нибудь «электрического насоса» мы можем поддерживать разность потенциалов между пластинами, и тогда по проводнику, соединяющему пластины, будет протекать непрекращающийся (постоянный) поток электронов, т. е. постоянный электрический ток. Таким «электрическим насосом» является, например, обычный гальванический элемент (фиг. 32).

Таким образом, для поддержания постоянного электрического тока в проводнике необходимо поддерживать на концах проводника постоянную разность потенциалов. Электрическая цепь тока должна быть при этом замкнутой.

Работа, совершаемая «электрическим насосом» по поднятию одного единичного заряда от низшего потенциала к выс-



Фиг. 32. Замкнутая электрическая цепь.

а — гальванический элемент выполняет в электрической цепи роль „электрического насоса". *б* – условное изображение электрической цепи.

щему, называется электродвижущей силой (сокращенно э. д. с.). Таким образом, э д. с. является причиной, поддерживающей разность потенциалов или напряжение.

Электродвижущая сила так же, как и напряжение, измеряется в вольтах, киловольтах, милливольтах и микровольтах в зависимости от ее величины.

Электродвижущую силу в формулах обозначают буквой E.

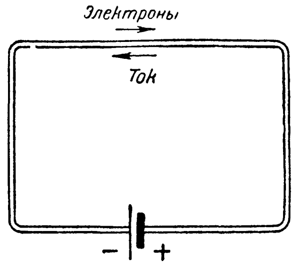
17. НАПРАВЛЕНИЕ И СИЛА ТОКА

Свободные электроны в проводнике всегда движутся от низкого потенциала в сторону более высокого потенциала. Но еще до открытия электронов, когда природа электрического тока была недостаточно ясной, условились считать ток текущим от высшего потенциала к низшему, т. е. в направлении, противоположном действительному движению электронов в проводнике (фиг. 33).

Чтобы не изменять установившихся положений, решили сохранить эту условность и после открытия электронов. Таким образом, нам необходимо запомнить, что направле-

ние тока противоположно направлению действительного движения электронов в проводнике.

Иногда электрический ток создается не движением электронов, а движением положительно заряженных частиц — ионов (например, в газовых трубках). В этом случае направление действительного движения электрических зарядов (ионов) совпадает с условным направлением электрического тока.



Фиг. 33. Движение электронов и направление тока.

Электроны движутся в одну сторону, а „ток" — в другую. В действительности движутся только электроны, направление тока — условно.

Число упорядоченно движущихся по проводнику электронов и средняя скорость их упорядоченного движения определяют количество электричества, проходящее за единицу времени через сечение проводника, т. е. силу тока в проводнике.

Таким образом, силой электрического тока в проводнике называется количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в течение одной секунды.

Так как в одну секунду через поперечное сечение проводника, даже при самых малых силах тока проходят огромные количества электронов, то неразумно было бы принять за единицу количества электричества заряд электрона. Также неразумно было бы, например, измерять количество муки, смолотой за секунду, числом крупинок, высыпающихся из-под жерновов мельницы.

В качестве единицы количества электричества, как уже было указано выше, принят кулон. Сила же тока измеряется единицей, называемой ампер.

Если через поперечное сечение проводника в течение одной секунды проходит 1 *к* электричества, то это соответствует силе тока в 1 *а*. И наоборот, если по проводнику течет ток силой в 1 *а*, то через поперечное сечение проводника в течение одной секунды проходит 1 *к* электричества.

В формулах приняты следующие обозначения:

I — сила тока в *а*;

Q — количество электричества в *к*;

t — время прохождения тока в *сек*.

Пользуясь этими обозначениями, напишем в виде формулы определения, приведенные выше:

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (7)$$

$$Q = It. \quad (7а)$$

Иногда, когда приходится иметь дело с токами малой силы, ампер оказывается слишком большой единицей измерения, тогда силу тока выражают в тысячных долях ампера (в миллиамперах) и в миллионных долях ампера (в микроамперах).

Миллиампер обозначается буквами *ма*, а микроампер— буквами *мка*

$$1\ а = 1\,000\ ма = 1\,000000\ мка.$$

Пример 7. Сила тока, потребляемого радиоприемником, равна 43 *ма*. Какое количество электричества прошло через приемник, если он работал 3 часа?

Решение:

1) 43 *ма* = 0,043 *а*.
2) 3 часа = 3·60·60 = 10 800 сек.
4) $Q = It = 0{,}043 \cdot 10\,800 \approx 464$ *к* (амперсекунды).

18. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ

Электроны, двигаясь по проводнику, сталкиваются с его молекулами. Как часто происходят эти столкновения, зависит в значительной мере от строения вещества проводника, т. е. от того, насколько «тесно» расположены молекулы в проводнике, от размеров молекул, от количества свободных электронов и т. п. При каждом столкновении с молекулой электрон теряет свою скорость, приобретенную под действием разности потенциалов. Следовательно, чем больше таких столкновений будут испытывать электроны на своем пути, тем меньше будет средняя скорость их движения вдоль проводника.

Столкновения электронов с молекулами проводника препятствуют продвижению электронов и служат причиной сопротивления, оказываемого проводником электрическому току. Электрическое сопротивление аналогично трению, затрудняющему механическое движение. Например, трение воды о стенки трубы замедляет течение воды в ней.

За единицу измерения сопротивления принято сопротивление, оказываемое электрическому току столбиком ртути сечением в 1 *мм*² и высотой в 106,3 *см*. Эта единица сопротивления, с которой сравнивают сопротивления всех проводников,

называется ом. Для обозначения сопротивления в формулах принята буква R.

Кроме ома для измерения больших сопротивлений применяются единицы, из которых одна в тысячу раз, а другая в миллион раз больше ома. Первая называется килоом (*ком*), а вторая — мегом (*мгом*):

$$1 \textit{ мгом} = 1\,000 \textit{ ком} = 1\,000\,000 \textit{ ом}.$$

Сопротивление проводника зависит не только от материала, из которого он сделан, но и от его размеров, т. е. от длины и поперечного сечения. Само собой разумеется, что чем длиннее проводник, тем больше произойдет столкновений электронов с молекулами при движении электронов вдоль проводника. С другой стороны, электронам будет легче двигаться по толстому проводнику, чем по тонкому. Итак, сопротивление проводника возрастает при увеличении его длины и уменьшается при увеличении его поперечного сечения.

Для того чтобы определить, каково будет сопротивление проводника, изготовленного из какого-либо материала и при определенной его длине и поперечном сечении, необходимо знать так называемое удельное сопротивление. Удельным сопротивлением какого-либо материала называется сопротивление проводника, сделанного из этого материала, если он имеет длину 1 *м* и поперечное сечение 1 *мм*². Удельные сопротивления некоторых материалов приведены в табл. 2.

Если нам, например, необходимо вычислить, какое сопротивление будет иметь медный проводник длиной в 4 *км* и сечением в 4 *мм*², то мы будем рассуждать следующим образом.

Из табл. 2 видно, что удельное сопротивление медного проводника равно 0,0178 *ом*. Сопротивление проводника такой же толщины, но длиной в 4 *км* (т. е. 4 000 *м*) будет в 4 000 раз больше, т. е. будет равно $0{,}0178 \cdot 4\,000 = 71{,}2$ *ом*.

Наш проводник имеет сечение не 1 *мм*², а 4 *мм*², т. е. он равноценен четырем одномиллиметровым проводникам, скрученным в жгут. Следовательно, его сопротивление в 4 раза меньше, т. е.

$$R = \frac{0{,}0178 \cdot 4\,000}{4} = \frac{71{,}2}{4} = 17{,}8 \textit{ ом}.$$

Обозначим через ρ — удельное сопротивление материала проводника;

l — длину проводника в *м* и S — площадь поперечного сечения проводника в *мм*².

После введения этих обозначений можно выведенную нами зависимость сопротивления проводника от материала и геометрических размеров записать в виде следующей формулы:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \tag{8}$$

Таблица 2

Удельные сопротивления и температурные коэффициенты некоторых проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление	Температурный коэффициент
Медь	0,0178	0,0044
Алюминий	0,0278	0,00423
Железо	0,1200	0,00625
Никелин	0,33	0,0003
Нихром	1,05	0,0002
Манганин	0,43	0,0003
Константан	0,49	0,00004

Величина, обратная сопротивлению $\left(\frac{1}{R}\right)$, называется проводимостью и обозначается буквой G. Единицей измерения проводимости служит сименс—величина, обратная ому. Если, например, сопротивление какого-либо проводника равно 10 *ом*, то его проводимость равна 0,1 сименса.

Пример 8. Вычислить сопротивление медного провода длиной в 2 *км* и сечением 4 *мм*².

Решение:

1) $l = 2$ *км* $= 2\,000$ *м*; $S = 4$ *мм*²; $R = ?$
$\rho = 0{,}0178$ (из табл. 2).

2) $R = \rho \frac{l}{S} = 0{,}0178 \frac{2\,000}{4} = 8{,}9$ *ом*,

19. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сопротивление проводника зависит также и от его температуры. С повышением температуры возрастает скорость хаотического (теплового) движения молекул и электронов,

вследствие чего столкновения между ними становятся более частыми и сопротивление проводника увеличивается. Следовательно, сопротивление металлических проводников увеличивается при повышении их температуры.

Величина, характеризующая, насколько увеличивается сопротивление проводника в 1 *ом* при повышении температуры на один градус по Цельсию, называется температурным коэффициентом данного вещества. Температурный коэффициент обозначается буквой α (альфа). Значения температурных коэффициентов для некоторых проводников приведены в табл. 2.

Пусть, например, первоначальное сопротивление никелинового проводника (до повышения температуры) было равно 50 *ом*, причем в процессе работы температура повысилась на 100°. Для того, чтобы вычислить прирост сопротивления, нужно температурный коэффициент никелина, взятый из табл. 2 (0,0003), умножить на число ом, т. е. на 50, и на число градусов, т. е. на 100.

Произведя это умножение, получим:

$$0{,}0003 \cdot 50 \cdot 100 = 1{,}5 \text{ ом}.$$

Общее же сопротивление проводника после повышения температуры на 100° С будет равно первоначальному его сопротивлению в 50 *ом* плюс прирост 1,5 *ом*, т. е. $R = 50 + 1{,}5 = 51{,}5$ *ом*.

Для того чтобы произвести эти расчеты в более общем виде, введем следующие обозначения:

t_1 — первоначальная температура проводника;

R_1 — сопротивление проводника в *ом* при первоначальной температуре;

t_2 — температура проводника после ее изменения;

R_2 — сопротивление проводника в *ом* после изменения его температуры.

Пользуясь этими обозначениями, напишем формулу для вычисления сопротивления проводника при повышении его температуры:

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2 - t_1).$$

Вынося R_1 за скобки, получим:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]. \qquad (9)$$

Проверим правильность этой формулы на приведенном выше примере:

$$R_1 = 50\ ом;\quad \alpha = 0{,}0003;\quad t_2 - t_1 = 100\ °C;$$
$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] = 50[1 + 0{,}0003 \cdot 100] =$$
$$= 50[1 + 0{,}03] = 50 \cdot 1{,}03 = 51{,}5\ ом.$$

Пример 9. Вычислить сопротивление реостата из никелиновой проволоки при температуре 100°C, если при температуре в 20°C оно равнялось 30 *ом.*

Решение.

1) $t_1 = 20°C$; $t_2 = 100°C$; $R_1 = 30$ *ом*; $\alpha = 0{,}0003$ (по табл. 2)

2) $R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] = 30[1 + 0{,}0003\ (100 - 20)] = 30\ (1 + 0{,}0003 \times \times 80) = 30 + 0{,}72 \approx 30{,}7$ *ом.*

20. ТИПЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

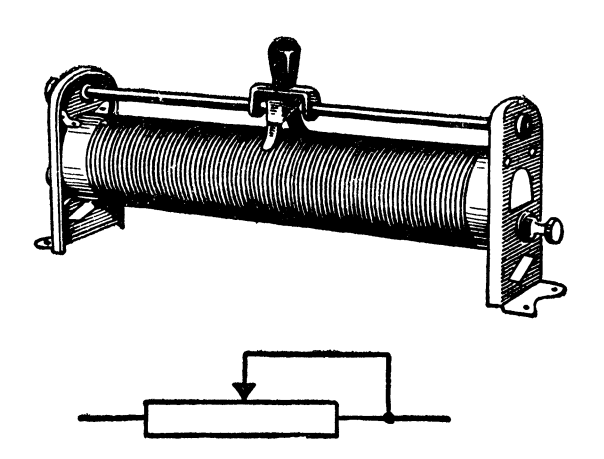
В электротехнике и радиотехнике часто практикуется включение в цепь тока специальных сопротивлений. В данном случае слово «сопротивление» означает не свойство проводника препятствовать протеканию через него электрического тока, а общее название целого класса специально изготовляемых электрических приборов и радиотехнических деталей.

Для регулирования тока в электрических цепях, например в цепи накала радиоприемника, применяют приборы, называемые реостатами. Реостаты выполняются из проволоки с большим удельным сопротивлением, например из никелиновой, намотанной на каркас из какого-нибудь изоляционного материала. Реостат представляет собой переменное сопротивление, так как его сопротивление можно изменять. Изменение сопротивления реостата достигается тем, что по проволоке перемещается металлический ползунок (фиг. 34). На фиг. 34 приведено также схематическое изображение реостата.

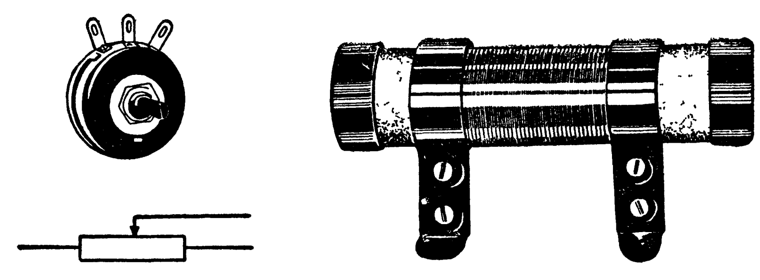
К переменным сопротивлениям относятся также потенциометры, применяемые в электротехнике и радиотехнике для деления напряжения. На фиг. 35 изображен такой потенциометр и его схематическое изображение.

Кроме переменных сопротивлений в радиотехнике применяется большое количество различных постоянных сопротивлений.

Постоянные сопротивления, рассчитанные на большие мощности (свыше нескольких ватт), изготовляются из проволоки с большим удельным сопротивлением и бывают либо открытого типа (фиг. 36), либо остеклованные (фиг. 37).

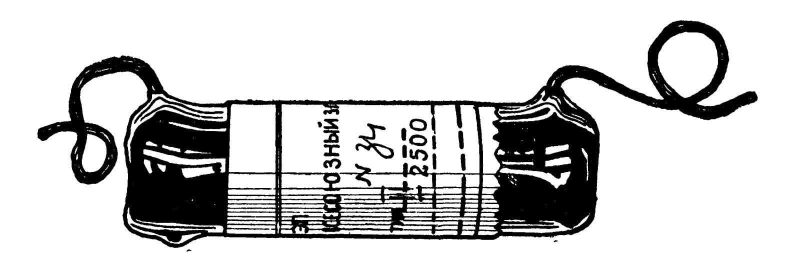


Фиг. 34. Реостат и его схематическое изображение.



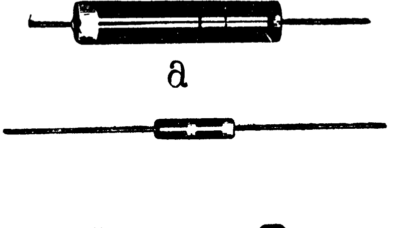
Фиг. 35. Потенциометр и его схематическое изображение.

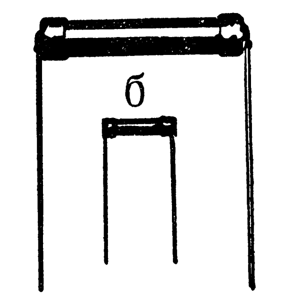
Фиг. 36. Постоянное проволочное сопротивление открытого типа.



Фиг. 37. Остеклованное проволочное сопротивление.

Сопротивления, рассчитанные на малые мощности (фиг. 38), выполняются в виде стеклянной трубочки с нанесенным на нее тонким слоем плохо проводящей массы. В оба конца трубочки вставляются медные проволочки, при помощи которых сопротивление присоединяется к схеме, а вся конструкция запрессовывается в пластмассу (сопротивления типа ТО).





Фиг. 38. Постоянные непроволочные сопротивления.

а — типа ТО на 1,5 и 0,25 *вт*; *б* — типа ЛС на 2 и 0,25 *вт*.

В другом, более лучшем типе постоянных сопротивлений тонкий слой массы с большим удельным сопротивлением наносится на маленький керамический цилиндрик (сопротивления типа ВС и ЛС). Для увеличения сопротивления слой наносится не на всю поверхность цилиндра, а по спирали. Для включения такого сопротивления в схему на его концах имеются металлические обоймы с припаянными к ним проволочками.

21. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обратимся к фиг. 31. Чем быстрее будет работать насос, изображенный на этой фигуре, тем больше будет разность уровней воды в сосудах или напор воды или тем быстрее будет протекать вода по соединительной трубке. Скорость циркуляции воды в замкнутой системе, изображенной на фиг. 31, будет прямо пропорциональна напору воды, создаваемому насосом. Но скорость циркуляции воды зависит не только от напора. Заменим соединительную трубку другой, более длинной.

Тогда циркуляция воды замедлится: насосу будет труднее проталкивать воду через длинную трубку, чем через короткую.

Аналогичные зависимости существуют и в электрической цепи (фиг. 32). Как мы уже знаем, движение электронов по проводнику, т. е. электрический ток, вызывается разностью электрических потенциалов. Сила тока в электрической цепи

будет тем больше, чем больше разность потенциалов (напряжение) на ее входных зажимах.

С другой стороны, сила тока зависит еще и от сопротивления цепи. Чем больше сопротивление цепи, тем меньше будет средняя скорость движения электронов (при одной и той же разности потенциалов) и, следовательно, тем меньше будет сила тока в цепи.

Зависимость силы тока в электрической цепи от напряжения на ее входных зажимах и от величины сопротивления цепи выражается законом Ома.

По закону Ома *сила тока, протекающего по электрической цепи, прямо пропорциональна напряжению, приложенному к входным зажимам этой цепи, и обратно пропорциональна сопротивлению цепи.*

Пользуясь известными нам обозначениями, можно написать закон Ома в виде следующей формулы:

$$I = \frac{U}{R}, \qquad (10)$$

где I — сила тока в *а*;

U — напряжение в *в*;

R — сопротивление в *ом*.

Из формулы (10) следует, что если напряжение U будет равно 1 *в*, а сопротивление $R = 1$ *ом*, то сила тока I будет равна 1 *а*. Значит, 1 *в* это такое напряжение, которое в цепи, имеющей сопротивление 1 *ом*, создает ток, сила которого равна 1 *а*.

Определим для примера, какой силы ток будет протекать по цепи, сопротивление которой равно 10 000 *ом*, если к зажимам этой цепи приложено напряжение в 120 *в*.

По закону Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{10\,000} = 0{,}012 = 12 \text{ ма}.$$

При помощи закона Ома можно вычислить напряжение на входных зажимах цепи, если известна сила тока и сопротивление цепи.

Для этого нужно воспользоваться видоизмененной формулой закона Ома:

$$U = IR. \qquad (10а)$$

Формула (10а) читается так: *напряжение, действующее в цепи, равно силе тока в ней, умно-*

женной на сопротивление цепи. Здесь, так же как и в формуле (10), напряжение должно быть в вольтах, сила тока в амперах, а сопротивление в омах.

Поясним это примером. Допустим, что необходимо определить напряжение, действующее на зажимах цепи сопротивлением в 10 000 *ом*, по которой протекает ток силой в 12 *ма* (0,012 *а*). Применяя закон Ома, выраженный в виде формулы (10а), найдем:

$$U = IR = 0{,}012 \cdot 10\,000 = 120 \text{ в.}$$

Закон Ома позволяет также определить сопротивление цепи, если известны приложенное к ней напряжение и сила тока в ней. Для этого применяется третья разновидность формулы закона Ома:

$$R = \frac{U}{I}. \qquad (10б)$$

Формула (10б) говорит нам, что сопротивление цепи (в омах) равно частному от деления напряжения на ее зажимах (в вольтах) на силу тока в ней (в амперах).

Например, если сила тока в цепи равна 0,012 *а*, а напряжение на ее зажимах 120 *в*, то по формуле (10б) сопротивление цепи будет равно:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0{,}012} = 120 : \frac{12}{1\,000} = \frac{120 \cdot 1\,000}{12} = 10\,000 \text{ ом.}$$

Для того чтобы не спутать в каких случаях нужно делить, а в каких умножать величины, входящие в формулы закона Ома, рекомендуется поступать следующим образом. Выпишите на листке бумаги величины, входящие в закон Ома, в следующем порядке:

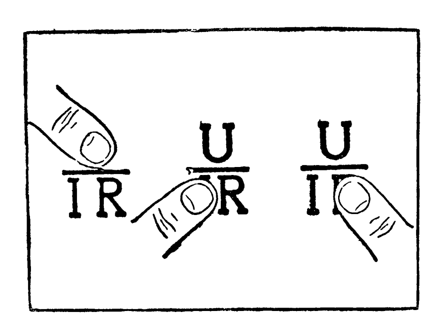
$$\frac{U}{I \cdot R}.$$

Закройте пальцем ту величину, которую вы хотите определить; тогда относительное расположение двух других величин, оставшихся незакрытыми, покажет, какое действие нужно над ними произвести, чтобы получить неизвестную величину. Например, для того чтобы определить напряжение, закроем бук-

ву U (фиг. 39), и нам сразу станет ясным, что величины I и R следует перемножить.

Закон Ома справедлив не только для электрической цепи в целом, но и для любого из ее участков. Какие бы две точки цепи мы ни взяли, мы можем применить закон Ома для вычисления напряжения или сопротивления между этими точками или для вычисления силы тока в цепи. Необходимо только иметь в виду, что если мы хотим вычислить напряжение между двумя данными точками, то в формулу Ома следует подставлять сопротивление участка цепи также между этими точками, и наоборот.

Напряжение, приложенное к зажимам электрической цепи, «проталкивает» ток по ней, преодолевая ее сопротивление.



Фиг. 39. Правило пальца.

Для нахождения одной из величин, входящих в формулу закона Ома, закройте буквенное обозначение этой величины пальцем: взаимное расположение двух оставшихся величин покажет порядок действия над ними.

Предположим, что мы имеем гирлянду из 12 электрических лампочек для украшения новогодней елки (фиг. 40).

Для «проталкивания» тока через всю гирлянду электрических лампочек требуется напряжение в 120 *в;* при этом по ней протекает ток силой 2 *а*. По закону Ома мы сможем определить сопротивление всей цепи из 12 электрических лампочек. Оно равно:

$$R=\frac{U}{I}=\frac{120}{2}=60 \text{ ом}.$$

Сопротивление отдельной лампочки в 12 раз меньше, т. е. равно 5 *ом*.

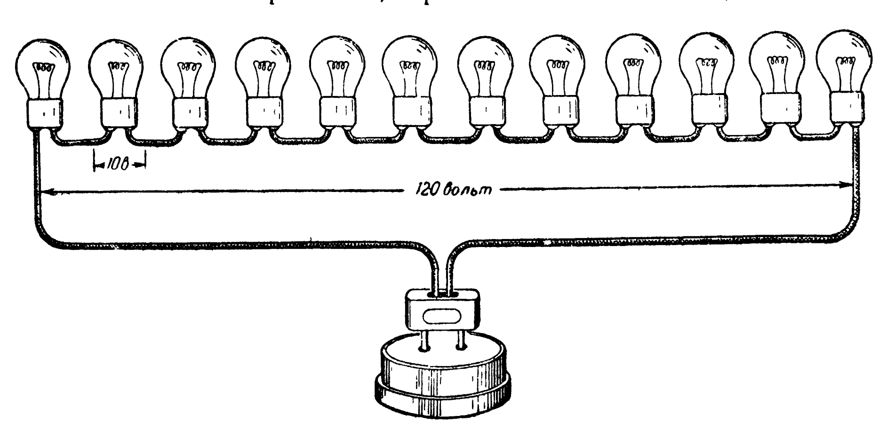
Какое же напряжение требуется для того, чтобы «протолкнуть» ток силой 2 *а* через лампочку сопротивлением 5 *ом*?

По закону Ома

$$U = IR = 2 \cdot 5 = 10 \text{ в.}$$

Эта величина называется **падением напряжения** на одной лампочке. Падение напряжения на двух лампочках будет равно 20 *в*, на трех—30 *в*, а на всех двенадцати—120 *в*.

Таким образом, мы установили, что для поддержания электрического тока в каком-либо участке цепи потребуется только часть общего напряжения, приложенного к этой цепи. Эта



Фиг. 40. Падение напряжения на отдельных участках цепи.

В электрической цепи 12 лампочек. На каждую из лампочек падает $^{1}/_{12}$ часть общего напряжения.

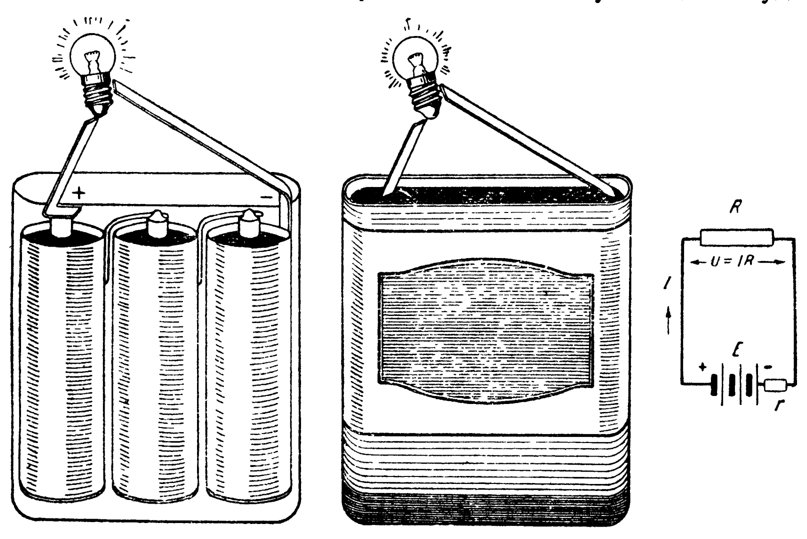
часть общего напряжения называется падением напряжения на данном участке.

Так же как и напряжение на зажимах всей цепи, падение напряжения на отдельном ее участке будет тем больше, чем больше сила тока в цепи и чем больше сопротивление данного ее участка. Для вычисления падения напряжения следует пользоваться формулой (10а).

Падение напряжения вдоль всей цепи равно сумме падений напряжения на всех отдельных ее участках и равно напряжению, приложенному к входным зажимам цепи.

Потребители электрического тока (например, электрические лампы) вместе с источником тока образуют замкнутую электрическую цепь. На фиг. 41 изображена замкнутая электрическая цепь, составленная из электрической лампочки от карманного фонарика и батареи гальванических элементов.

Ток, проходящий через лампочку, проходит также и через источник тока. Следовательно, проходя по цепи, ток кроме сопротивления проводника встретит еще и то сопротивление, которое ему будет оказывать сам источник тока (сопротивление электролита между пластинами гальванических элементов и сопротивление пограничных слоев электролита и пластин). Следовательно, общее сопротивление замкнутой цепи будет



Фиг. 41. Падение напряжения внутри источника тока.

Падение напряжения происходит как на внешнем сопротивлении (R), так и на внутреннем (r).

складываться из сопротивления лампочки и сопротивления источника тока.

Сопротивление нагрузки, присоединенной к источнику тока, принято называть **внешним сопротивлением**, а сопротивление самого источника тока — **внутренним сопротивлением**. Внутреннее сопротивление обозначается буквой r.

Если по цепи, изображенной на фиг. 41, протекает ток I, то для поддержания этого тока во внешней цепи согласно закону Ома (10а) между концами ее должна существовать разность потенциалов, равная IR. Но этот же ток I протекает и по внутренней цепи Следовательно, для поддержания тока во внутренней цепи также необходимо существование разности

потенциалов между концами сопротивления r. Эта разность потенциалов по закону Ома должна быть равна Ir.

Поэтому для поддержания тока в цепи э. д. с. элемента должна иметь величину.

$$E = IR + I \cdot r.$$

Эта формула показывает, что э. д. с. в цепи равна сумме внешнего и внутреннего падений напряжения.

Выносся I за скобки, получим:

$$E = I(R + r) \qquad (11)$$

или

$$I = \frac{E}{R + r}. \qquad (11a)$$

Две последние формулы являются выражением закона Ома для замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи формулируется так: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна э. д. с. в цепи и обратно пропорциональна общему сопротивлению цепи. Под общим сопротивлением подразумевается сумма внешнего и внутреннего сопротивлений.

Пример 10. Сопротивление нити накала радиолампы в нагретом состоянии равно 53 *ом*. Какой ток течет по нити, если к ней приложено напряжение в 4 *в*?

Решение:

1) $R = 53$ *ом*; $U = 4$ *в*; $I = ?$

2) $I = \frac{U}{R} = \frac{4}{53} = 0{,}0755$ *а* $= 75{,}5$ *ма*.

Пример 11. Какое нужно приложить напряжение к нити накала радиолампы для того, чтобы сила тока в нити равнялась 160 *ма*, если сопротивление нити в нагретом состоянии равно 25 *ом*?

Решение:

1) $I = 160$ *ма* $= 0{,}16$ *а*; $R = 25$ *ом*; $U = ?$

2) $U = IR = 0{,}16 \cdot 25 = 4$ *в*.

Пример 12. Определить величину неизвестного сопротивления, если по нему проходит ток силой 2 *ма*, при разности потенциалов между его концами в 50 *в*.

Решение:

1) $I = 2$ *ма* $= 0{,}002$ *а*; $U = 50$ *в*; $R = ?$

2) $R = \frac{U}{I} = \frac{50}{0{,}002} = 25\,000$ *ом*,

Пример 13. Вычислить падение напряжения на реостате, сопротивление которого равно 5 *ом*, если по нему проходит ток силой 0,5 *а*.

Решение:

1) $I = 0{,}5$ *а*; $R = 5$ *ом*; $U = ?$

2) $U = IR = 0{,}5 \cdot 5 = 2{,}5$ *в*.

Пример 14. Гальванический элемент с э. д. с., равной 1,1 *в*, и внутренним сопротивлением в 1 *ом* замкнут на сопротивление, равное 10 *ом*. Определить силу тока в этой цепи.

Решение:

1) $E = 1{,}1$ *в*; $r = 1$ *ом*; $R = 10$ *ом*; $I = ?$

2) $I = \frac{E}{R + r} = \frac{1{,}1}{10 + 1} = 0{,}1$ *а* $= 100$ *ма*.

22. МОЩНОСТЬ И РАБОТА ТОКА

Ранее мы сравнивали электрический ток с течением жидкости по трубке, а напряжение или разность потенциалов — с разностью уровней жидкости.

Продолжим это сравнение. Поток воды, падающий сверху вниз, несет с собой определенное количество энергии. В условиях свободного падения эта энергия растрачивается бесполезно для человека. Если же направить падающий поток воды на лопасти турбины, то последняя начнет вращаться и сможет производить полезную работу.

Работа, производимая потоком воды в течение определенного промежутка времени, например, в течение одной секунды, будет тем больше, чем с большей высоты падает поток и чем больше масса падающей воды.

Точно так же и электрический ток, протекая по цепи от высшего потенциала к низшему, совершает работу. В каждую данную секунду времени будет совершаться тем больше работы, чем больше разность потенциалов и чем большее количество электричества ежесекундно проходит через поперечное сечение цепи.

Количество работы, совершаемой за одну секунду времени, или скорость совершения работы, называется мощностью.

Количество электричества, проходящего через поперечное сечение цепи в течение одной секунды, есть не что иное, как сила тока в цепи. Следовательно, мощность электрического тока будет прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) и силе тока в цепи.

Для измерения мощности электрического тока принята единица, называемая в а т т (сокращенное обозначение *вт*).

Мощностью в 1 *вт* обладает ток силой в 1 *а* при разности потенциалов, равной 1 *в*.

Для вычисления мощности постоянного тока в ваттах нужно силу тока в амперах умножить на напряжение в вольтах.

Если обозначить электрическую мощность буквой P, то приведенное выше правило можно записать в виде формулы

$$P = I \cdot U. \qquad (12)$$

Воспользуемся этой формулой для решения числового примера.

Требуется определить, какая мощность необходима для накала нити радиолампы, если напряжение накала равно 4 *в*, а ток накала 75 *ма*.

Сначала выразим силу тока в амперах. Получим:

$$I = 75\ \textit{ма} = 0{,}075\ \textit{а}.$$

Теперь определим мощность тока, поглощаемую нитью лампы, т. е.

$$P = IU = 0{,}075 \cdot 4 = 0{,}3\ \textit{вт}.$$

В технике радиоприемных устройств часто приходится иметь дело с очень малыми мощностями, для измерения которых ватт оказывается слишком крупной единицей. В этих случаях мощность измеряют единицей, в 1 000 раз меньшей ватта. Называется эта единица милливатт (*мвт*). Но иногда и милливатт оказывается большим. Тогда применяют миллионную долю ватта или микроватт (*мквт*).

Таким образом:

$$1\ \textit{вт} = 1\,000\ \textit{мвт} = 1\,000\,000\ \textit{мквт},$$

$$1\ \textit{мвт} = 1\,000\ \textit{мквт}.$$

В решенном нами примере мощность, поглощаемая нитью радиолампы, выраженная в милливаттах, будет равна 300 *мвт*.

Наоборот, в технике радиопередающих устройств для измерения мощности приходится применять единицы в 100, в 1 000 и в 1 000 000 раз больше ватта. Называются эти единицы гектоватт (*гвт*), киловатт (*квт*) и мегаватт (*мгвт*).

$$1\ \textit{мгвт} = 1\,000\ \textit{квт} = 10\,000\ \textit{гвт} = 1\,000\,000\ \textit{вт},$$

$$1\ \textit{квт} = 10\ \textit{гвт} = 1\,000\ \textit{вт},$$

$$1\ \textit{гвт} = 100\ \textit{вт},$$

Мощность электрического тока можно вычислить и другим путем. Предположим, что нам известны сила тока в цепи и сопротивление цепи, а напряжение неизвестно.

В этом случае мы воспользуемся знакомым нам соотношением из закона Ома (10а):

$$U = IR$$

и подставим правую часть этого равенства (IR) в формулу (12) вместо напряжения U.

Тогда формула (12) примет вид:

$$P = IU = I \cdot I \cdot R$$

или

$$P = I^2R. \qquad (12а)$$

Например, требуется узнать, какая мощность теряется в реостате сопротивлением в 5 *ом*, если через него проходит ток силой 0,5 *а*.

Пользуясь формулой (12а), найдем:

$$P = I^2R = 0{,}5^2 \cdot 5 = 0{,}25 \cdot 5 = 1{,}25 \text{ вт}.$$

Наконец, мощность может быть вычислена и в том случае, когда известны напряжение и сопротивление, а сила тока неизвестна. Для этого вместо силы тока I в формулу (12) подставляется известное из закона Ома отношение $\frac{U}{R}$ $\left(\text{так как } I = \frac{U}{R}\right)$, и тогда формула (12) приобретает следующий вид:

$$P = IU = \frac{U}{R} \cdot U$$

или

$$P = \frac{U^2}{R}. \qquad (12б)$$

Например, при 2,5 *в* падения напряжения на реостате сопротивлением в 5 *ом* поглощаемая реостатом мощность будет равна:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{2{,}5^2}{5} = \frac{6{,}25}{5} = 1{,}25 \text{ вт}.$$

Таким образом для вычисления мощности требуется знать любые две из величин, входящих в формулу закона Ома.

Мощность равна работе, производимой в течение одной секунды. Поэтому, если мы хотим узнать, какую работу произвел ток, протекая по цепи в течение нескольких секунд, мы должны умножить мощность на это число секунд.

Например, через реостат с сопротивлением 5 *ом* протекает ток силой 0,5 *а*. Нужно определить, какую работу произведет ток в течение 4 час. (14 400 сек.). Так как работа тока в одну секунду будет равна:

$$P = I^2R = 0{,}5^2 \cdot 5 = 0{,}25 \cdot 5 = 1{,}25 \text{ вт},$$

то за время $t = 14\,400$ сек. она будет в 14 400 раз больше. Следовательно, работа A будет равна:

$$A = Pt = 1{,}25 \cdot 14\,400 = 18\,000 \text{ вт} \cdot \text{сек}.$$

Ваттсекунда или, как ее иначе называют, джоуль, является слишком малой единицей для измерения работы тока. Поэтому на практике пользуются единицей, называемой ваттчас (*втч*).

Один ваттчас равен 3 600 *дж*, так как в часе 3 600 сек.
1 *втч* = 3 600 *дж*.

В нашем последнем примере работа тока, выраженная в ваттчасах, будет равна:

$$A = 1{,}25 \cdot 4 = 5 \text{ втч}.$$

В электротехнике для измерения работы тока применяются еще большие единицы, называемые гектоваттчас (*гвтч*) и киловаттчас (*квтч*):

$$1 \text{ квтч} = 10 \text{ гвтч} = 1\,000 \text{ втч} = 3\,600\,000 \text{ дж},$$

$$1 \text{ гвтч} = 100 \text{ втч} = 360\,000 \text{ дж},$$

$$1 \text{ втч} = 3\,600 \text{ дж}.$$

Пример 15. Какую работу произвел электрический ток силой 12 *а*, протекая по проводнику в течение 30 сек., если разность потенциалов между концами проводника равна 10 *в*?

Решение:

1) $U = 10$ *в*; $I = 12$ *а*; $t = 30$ сек.
2) $A = Pt = UIt = 10 \cdot 12 \cdot 30 = 3\,600$ *дж* $= 1$ *втч*.

Пример 16. Какую работу произвел электрический ток силой 2 *а*, протекая по проводнику, сопротивление которого равно 10 *ом*, в течение 5 час.?

Решение:

1) $I = 2$ *а*; $R = 10$ *ом*; $t = 5$ час.;
2) $A = Pt = I^2Rt = 2^2 \cdot 10 \cdot 5 = 200$ *втч*.

Пример 17. Какая мощность требуется для накала нити радиолампы, если напряжение накала равно 4 *в*, а сопротивление нити в нагретом состоянии составляет 25 *ом*?

Решение:

1) $U = 4$ *в*; $R = 25$ *ом*.
2) $P = \frac{U^2}{R} = \frac{4^2}{25} = \frac{16}{25} = 0{,}64$ *вт*.

23. ТЕПЛОВОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Электроны, продвигаясь вдоль проводника, сталкиваются с его молекулами и увеличивают тепловое движение молекул в проводнике. Электрическая энергия превращается в тепловую, в результате чего проводник нагревается.

Опытом было установлено, что вся энергия электрического тока в цепи превращается в тепловую, т. е. расходуется на нагревание проводников и приборов, включенных в цепь.

Русским ученым Э. Х. Ленцем и англичанином Джоулем было установлено, что ток силой в 1 *а*, проходя по проводнику сопротивлением в 1 *ом*, в течение одной секунды выделяет в нем 0,24 малой калории тепловой энергии. Одна малая калория — это количество тепла, необходимое для нагревания одного кубического сантиметра воды на 1° по Цельсию.

Следовательно, по закону, установленному Ленцом и Джоулем, одна ваттсекунда (один джоуль) равна 0,24 малой калории.

$$1 \text{ дж} = 0{,}24 \text{ кал.}$$

Поэтому для перехода от единиц электрической энергии к единицам тепловой энергии необходимо первые умножить на 0,24.

Обозначив количество тепла буквой q, можно выразить закон Ленца-Джоуля в виде следующей формулы:

$$q = 0{,}24 \cdot P \cdot t \qquad (13)$$

Решим пример. Сколько теплоты выделится в проводнике сопротивлением в 5 *ом* при протекании через него тока силой в 10 *а* в течение 20 сек.

Вычислим вначале мощность P.

$$P = I^2R = 10^2 \cdot 5 = 500 \text{ вт.}$$

Затем применим формулу (13):

$$q = 0{,}24 \cdot P \cdot t = 0{,}24 \cdot 500 \cdot 20 = 2\,400 \text{ кал.}$$

Из полученного результата мы видим, что теплотой, выделившейся в проводнике, можно нагреть до температуры 100° С 24 *см*³ воды или нагреть 2,4 *л* воды на 1° С.

Открытие теплового действия электрического тока послужило основой для изобретения русским ученым А. Н. Лодыгиным (1873 г.) электрической лампы накаливания. В электрической лампе большая часть электрической энергии пре-

вращается в тепловую и очень незначительная часть — в световую энергию.

На тепловом действии тока основано также устройство всевозможных электронагревательных приборов, плавких предохранителей, тепловых амперметров и т. д.

В силу того обстоятельства, что все проводники в той или иной мере нагреваются при прохождении по ним электрического тока, существуют определенные нормы (см. табл. 3) допустимой нагрузки проводников током.

Таблица 3

Допустимые нагрузки медных проводников электрическим током

(в амперах)

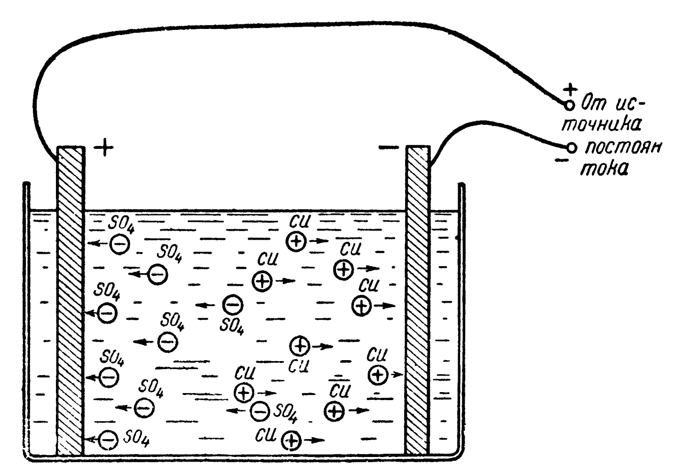
Диаметр провода, *мм*	Допустимая сила тока, *а*		
	для открытых проводов	для изолированных проводов	для обмоток трансформаторов и дросселей
0,25	—	—	0,1
0,5	—	4	0,4
0,75	—	7	0,9
1,0	17	9	1,5
1,5	27	15	3,5
2,0	40	22	6,0
2,5	54	31	9,0
3,0	68	40	12,0

Электрический ток может проходить не только по металлическим или иным твердым проводникам. При определенных условиях жидкости и газы также становятся проводниками электричества. Однако, в обоих последних случаях электрические заряды переносятся не в виде свободных электронов, а при помощи заряженных частичек вещества, называемых ионами.

При растворении в воде солей или кислот их молекулы распадаются на две части, одна из которых имеет положительный электрический заряд, а другая — отрицательный. Это и есть ионы (слово «ион» значит — блуждающий). Ионы беспорядочно движутся в растворе, как свободные электроны в проводнике.

Если в такой раствор опустить два металлических стержня или пластинки, присоединенные к противоположным полюсам источника тока (фиг. 42), то положительные ионы устремятся к отрицательной пластинке, а отрицательные ионы — к положительной пластинке. В цепи возникнет и будет поддерживаться электрический ток.

Так как ионы представляют собой заряженные частицы вещества, то прохождение тока через растворы сопровождается переносом молекул вещества с одного электрода на другой и химическими реакциями. На химическом действии тока при прохождении его через растворы основано устройство электрических аккумуляторов, гальванопластика, гальваностегия, производство химически чистой меди, алюминия и т. д.



Фиг. 42. Прохождение тока через водный раствор медного купороса.

Молекулы медного купороса распадаются в воде на две части — на положительные и отрицательные ионы. Положительные ионы устремляются к отрицательной пластине, а отрицательные — к положительной.

Пример 18. Нужно вскипятить литр воды. Определите, какое количество электрической энергии надо затратить на это, если начальная температура воды равна 13,6°С.

Решение. Так как 1 *л* воды содержит 1 000 *см*³, а для нагрева 1 *см*³ на 1°С расходуется 1 *кал.* тепла, то для нагрева 1 *л* воды на 1°С потребуется 1 000 *кал.*

Чтобы довести это количество воды до точки кипения, т. е. до 100°С, потребуется:

$$1\,000\,(100-13{,}6) = 1\,000 \cdot 86{,}4 = 86\,400 \text{ кал}$$

Итак:

$$q = 86\,400 \text{ кал.}$$

Из формулы (13) следует, что

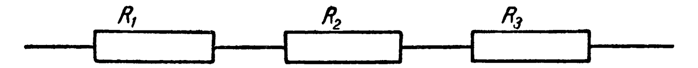
$$A = \frac{q}{0{,}24} = \frac{86\,400}{0{,}24} = 360\,000 \text{ дж} = 100 \text{ втч} = 1 \text{ гвтч.}$$

В действительности же придется затратить энергии несколько больше, чем 1 *гвтч*, потому что часть выделяемого током тепла будет нагревать окружающий воздух, а не воду.

24. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Сопротивления, входящие в электрическую цепь, могут быть соединены между собой различными способами.

Если сопротивления включены в цепь таким образом, что конец первого сопротивления соединен с началом второго, конец второго — с началом третьего и т. д. (фиг. 43), то такое соединение называется последовательным. При последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи увеличивается, потому что увеличивается путь электронов. Общее сопротивление группы, составленной из ряда сопротивлений, соединенных последовательно, равно сумме всех этих сопротивлений. Иными словами, несколько сопротивлений, соединенных последовательно, равноценны одному сопротивлению, величина которого равна сумме величин всех этих сопротивлений.



Фиг. 43. Последовательное соединение сопротивлений.

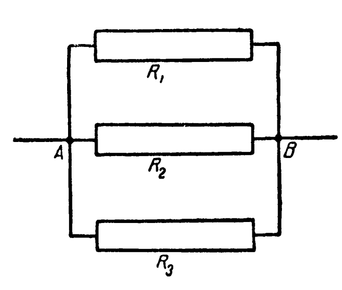
Занумеровав отдельные сопротивления, соединяемые последовательно, цифрами 1, 2, 3 и т. д., можно записать это правило в виде формулы

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots \tag{14}$$

Другим видом соединения сопротивлений является так называемое параллельное соединение (фиг. 44). Параллельным соединением сопротивлений называется такое соединение, при котором начала всех сопротивлений соединены в одной общей точке, а их концы — в другой общей точке.

При таком способе соединения сопротивлений электроны, дойдя до общей точки A, разделятся на отдельные потоки и будут двигаться дальше по всем сопротивлениям такой цепи. При этом по той из параллельных ветвей, где путь для электронов будем самым легким (ветвь с самым малым сопротивлением), пойдет наибольшее количество электронов, т. е. потечет наибольший ток, и, наоборот, по ветви с наибольшим сопротивлением потечет наименьший ток.

Силу тока в каждой из параллельных ветвей можно определить, пользуясь законом Ома. Для этого нужно разделить напряжение, действующее между точками A и B, на сопротивление той ветви, в которой мы хотим узнать силу тока.



Фиг. 44. Параллельное соединение сопротивлений.

При параллельном соединении сопротивлений путь для электронов становится более свободным, что равноценно уменьшению сопротивления. Действительно, общее сопротивление группы, составленной из нескольких сопротивлений, соединенных параллельно, всегда меньше самого малого из сопротивлений группы.

Если вместо понятия сопротивления воспользоваться понятием проводимости, то общая проводимость между точками разветвления будет равна сумме проводимостей отдельных параллельных ветвей, т. е. $G = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots$

Мы уже знаем, что проводимость — это величина, обратная сопротивлению; поэтому

$$G = \frac{1}{R}, \qquad G_1 = \frac{1}{R_1},$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2}, \qquad G_3 = \frac{1}{R_3}.$$

Таким образом, можно написать, что

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots \qquad (15)$$

Обозначения здесь те же, что и в предыдущей формуле, с той лишь разницей, что сопротивления R_1, R_2, R_3 и т. д. соединяются не последовательно, а параллельно.

Пользуясь формулой (15), можно подсчитать величину общего сопротивления R.

Пусть, например, $R_1=20$ *ом*, $R_2=25$ *ом* и $R_3=100$ *ом*. При параллельном соединении общая проводимость будет равна сумме проводимостей отдельных ветвей, т. е.

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}=\frac{1}{20}+\frac{1}{25}+\frac{1}{100}=\frac{5}{100}+\frac{4}{100}+$$
$$+\frac{1}{100}=\frac{5+4+1}{100}=\frac{10}{100}=\frac{1}{10}\text{ сименс.}$$

Следовательно, $R=10$ *ом*.

На практике часто встречается разветвление, состоящее только из двух параллельных ветвей. Для этого случая подсчет общего сопротивления можно произвести по более простой формуле:

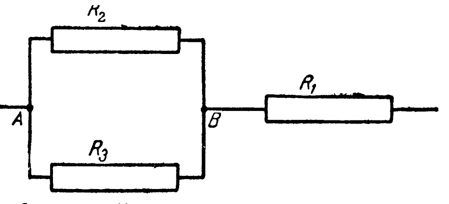
$$R=\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}. \qquad (15а)$$

Например, если $R_1=20$ *ом*, а $R_2=80$ *ом*, то

$$R=\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}=\frac{20\cdot 80}{20+80}=\frac{1\,600}{100}=16\text{ ом.}$$

Как и следовало ожидать, общее сопротивление оказалось меньше меньшего из соединенных сопротивлений.

Наиболее простым случаем параллельного соединения является случай, когда все соединяемые сопротивления одинаковы по величине. В этом случае общее сопротивление группы меньше отдельного сопротивления во столько раз, сколько имеется сопротивлений в группе.



Фиг. 45. Смешанное соединение сопротивлений.

Соединение сопротивлений, показанное на фиг. 45, называется смешанным, так как здесь мы имеем и параллельное и последовательное соединения.

Подсчет общего сопротивления в этом случае производится в такой последовательности. Вначале вычисляют сопротивление участка цепи между точками A и B по формуле (15а) для параллельного соединения сопротивлений, а затем полученное

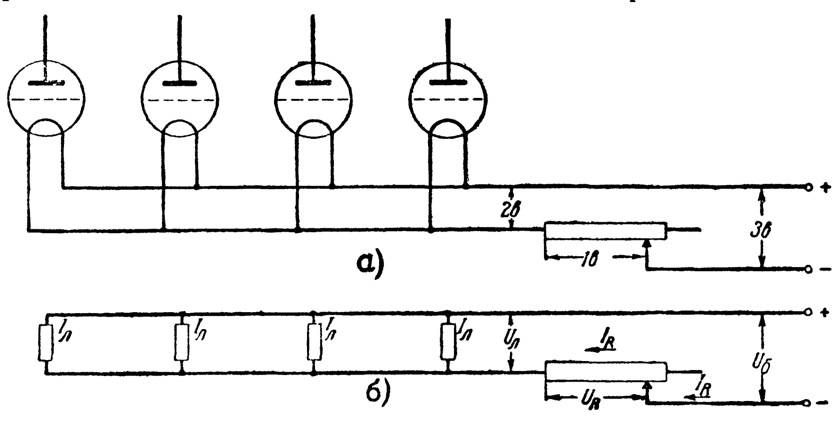
сопротивление складывают с сопротивлением R_1, соединенным последовательно с двумя первыми.

Например, если $R_1=9$ *ом*, $R_2=30$ *ом* и $R_3=70$ *ом*, то общее сопротивление этой цепи будет:

$$R=\frac{R_2\cdot R_3}{R_2+R_3}+R_1=\frac{30\cdot 70}{30+70}+9=\frac{2\,100}{100}+9=21+9=30 \text{ ом.}$$

Пример 19. На фиг. 46 изображена схема включения четырех радиоламп.

Для питания цепи накала лампы требуется ток 0,1 *а* при напряжении 2 *в*. В нашем распоряжении имеется батарея, обеспечивающая при данной нагрузке напряжение 3 *в*. Каково должно быть сопротивление реостата для того, чтобы погасить на нем избыток напряжения.



Фиг. 46. Схема гашения излишнего напряжения при помощи реостата.

Решение:

1. Для удобства решения начертим эквивалентную схему (фиг. 46,*б*). На эквивалентной схеме:

$I_л$ — ток накала через одну лампу;
$U_л$ — напряжение на лампах;
R — сопротивление реостата;
$U_б$ — напряжение батареи;
U_R — падение напряжения на реостате.

2. Ток через реостат равен сумме токов через все лампы:

$$I_R=4I_л=4\cdot 0{,}1=0{,}4 \text{ а.}$$

3. Падение напряжения на реостате должно погасить весь избыток напряжения батареи:

$$U_R=U_б-U_л=3-2=1 \text{ в.}$$

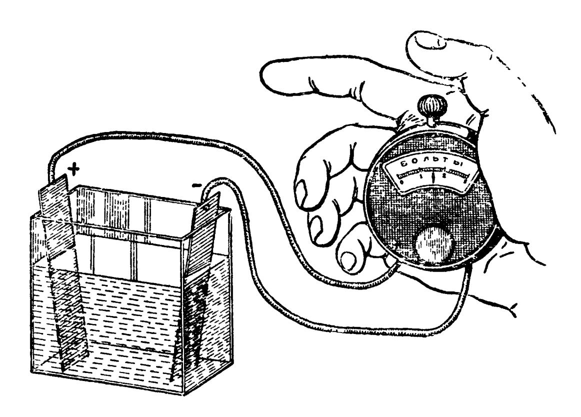
4. Сопротивление реостата будет равно падению напряжения на нем, деленному на силу протекающего через него тока:

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ ом.}$$

25. ПРОСТЕЙШИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Мы познакомились с основными понятиями и с простейшими расчетами, связанными с постоянным электрическим током. Нам остается рассмотреть самые необходимые и самые простые способы измерения электрических величин — напряжения, сопротивления и силы тока.

Для измерения напряжения применяются приборы, называемые **вольтметрами**. На шкале всякого вольтметра



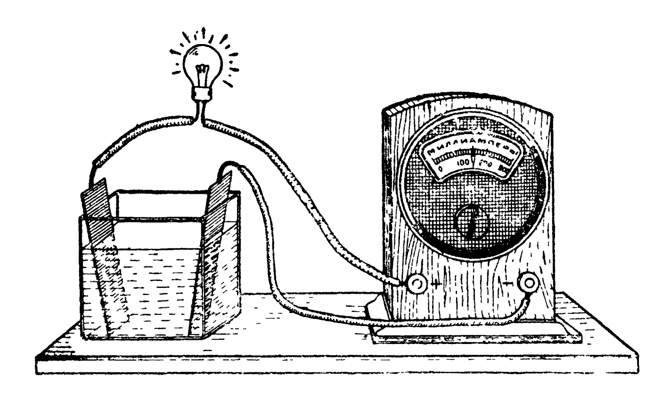
Фиг. 47. Измерение напряжения.

Вольтметр присоединяется параллельно к источнику тока.

нанесены деления от нуля до максимального напряжения, на которое он рассчитан. Внешний вид и способ подключения вольтметра к электрической цепи показан на фиг. 47. Из этой фигуры видно, что вольтметр подключается параллельно к тому участку электрической цепи (или батарее), напряжение которых должно быть измерено. Основным правилом при пользовании вольтметром является то, что внутреннее сопротивление вольтметра должно быть много больше (в 20—100 раз) внутреннего сопротивления источника тока или сопротивления участка цепи, на котором измеряется напряже-

ние. В противном случае показания вольтметра будут неправильными (заниженными), так как при подключении вольтметра будет увеличиваться падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока и на всех участках цепи, являющихся по отношению к вольтметру последовательными.

Измерение силы тока производится при помощи амперметра или миллиамперметра (фиг. 48). Амперметр, так же как и миллиамперметр, всегда включается в цепь



Фиг. 48. Измерение силы тока.

Амперметр включается в цепь последовательно.

тока последовательно. Внутреннее сопротивление амперметра должно быть, по возможности, малым, чтобы не увеличивать сколько-нибудь заметно сопротивления цепи.

Измерение сопротивлений можно производить с помощью вольтметра и амперметра. Для этого нужно измерить сначала напряжение на сопротивлении, а затем проходящий через него ток; после этого по закону Ома вычисляется сопротивление.

Для измерения сопротивлений существуют также и специальные приборы, называемые омметрами.

На фиг. 49 изображен универсальный прибор, при помощи которого можно производить измерения напряжения, сопротивления и силы тока.

26. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой электрический ток в металлическом проводнике?

2. Что такое э. д. с. и что такое напряжение?

3. Что называется силой тока?

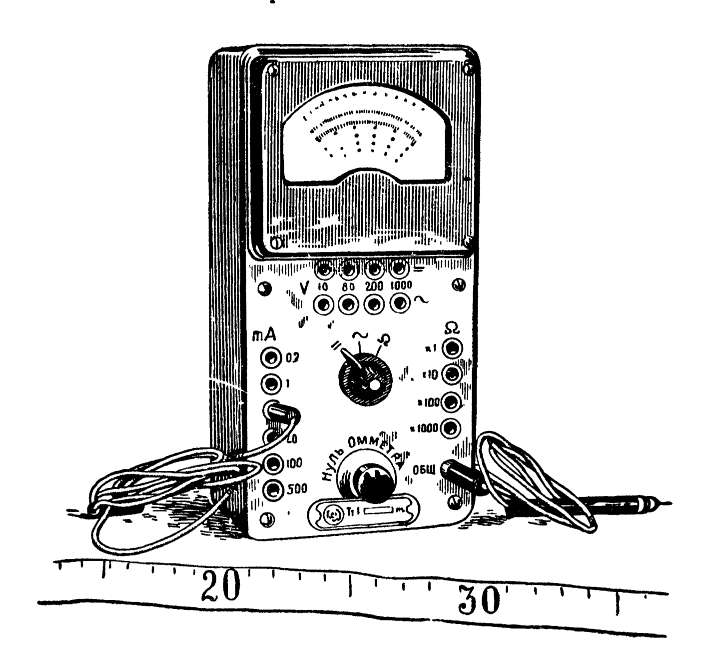
4 Как зависит сопротивление проводника от его размеров и материала?

5. Какими единицами измеряются напряжение, сила тока и сопротивление?

6 Как зависит сопротивление проводников от температуры?

7. Какие три формы имеет закон Ома?

8. Что такое падение напряжения и от чего оно зависит?



Фиг. 49. Универсальный измерительный прибор, позволяющий измерять напряжение, сопротивление и силу тока.

9. Что такое внутреннее сопротивление?

10. Какая разница между мощностью и работой?

11. Почему проводники нагреваются при протекании по ним электрического тока?

12. Как проходит электрический ток через жидкости?

13 Почему сопротивление цепи при последовательном соединении сопротивлений увеличивается, а при параллельном — уменьшается?

14. Как следует подключать вольтметр и амперметр к электрической цепи?

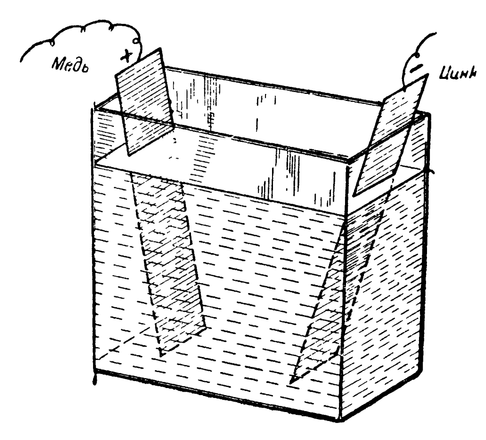
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И АККУМУЛЯТОРЫ

27. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Гальванические элементы широко распространены в радиолюбительской практике в качестве источников тока.

Простейший гальванический элемент состоит из двух пластин — цинковой и медной, опущенных в раствор серной кислоты в воде (фиг. 50). Пластины элемента называются электродами, а раствор, в который они опущены, — электролитом.

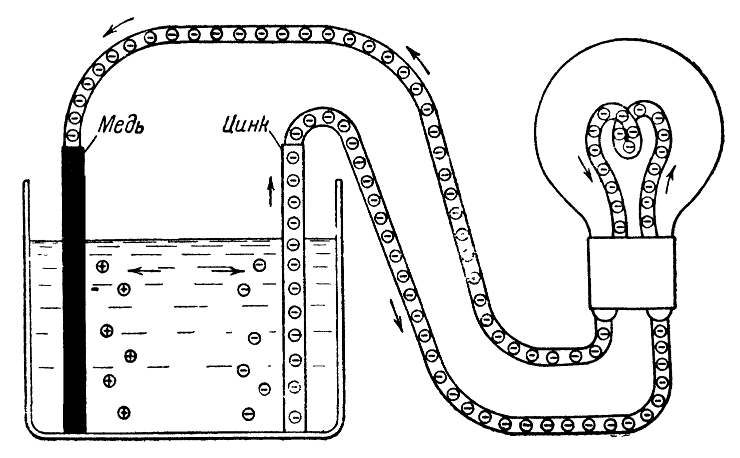


Фиг. 50. Простейший гальванический элемент — цинковая и медная пластины, опущенные в раствор серной кислоты в воде.

Серная кислота—вещество сложное. Каждая молекула серной кислоты состоит из одного атома серы (химическое обозначение серы S), двух атомов водорода (H_2) и четырех атомов кислорода (O_4). Химический состав серной кислоты условно записывается в виде формулы H_2SO_4. При растворении серной кислоты в воде связь между атомами, входящими в состав ее молекулы, ослабевает. Молекулы серной кислоты распадаются на две части. Этот распад молекул при растворении называется диссоциацией (разъединением). Одна частица распавшейся молекулы серной кислоты состоит из атома серы и четырех атомов кислорода (SO_4), а вторая — из двух атомов водорода (H_2).

При распаде молекулы серной кислоты на две части все электроны оказываются в первой частице молекулы, состоящей из серы и кислорода (SO_4), вторая же частица молекулы, состоящая из двух атомов водорода (H_2) остается совсем без электронов, представляя собой просто два ядра атома водорода. Вследствие этого первая частица молекулы ($SO^{-}{}_4$) приобретает отрицательный заряд (избыток электронов), а вторая (H_2^+) — положительный заряд (избыток протонов).

Как мы уже знаем, эти разноименно заряженные частицы молекулы называются **ионами**. Частица молекулы, имеющая отрицательный заряд, называется **отрицательным ионом**, а частица, имеющая положительный заряд,—**положительным ионом**. Отрицательные ионы, состоящие из серы и кислорода (SO_4^-), вступают в химическое соединение с цинковым электродом, образуя так называемый сернокислый



Фиг. 51. Гальванический элемент включен на работу.

Электроны непрерывно движутся по внешней цепи (через лампочку) от цинкового электрода к медному. Внутри элемента ток представляет собой движение ионов.

цинк. В результате этого химического соединения два электрона, «захваченные» ранее ионом у водорода, остаются свободными.

Так как число отрицательных ионов, участвующих в химической реакции, очень велико, то соответственно велико и количество свободных электронов, оседающих на цинковом электроде в результате этой реакции. Отталкиваясь друг от друга, свободные электроны распределяются по всей поверхности цинкового электрода и заряжают его отрицательным электричеством.

Если внешняя цепь элемента не замкнута, то дальнейшая химическая реакция должна прекратиться, потому что отрицательно заряженный цинковый электрод будет отталкивать все приближающиеся к нему отрицательные ионы. Между пластинами образуется разность потенциалов, равная э. д. с. элемента.

Если же замкнуть внешнюю цепь, например, подключив к элементу электрическую лампочку от карманного фонаря, то электроны устремятся по внешней цепи от цинкового электрода к медному (фиг. 51).

У поверхности медного электрода электроны, соединяясь с положительными ионами H_2^+, будут образовывать молекулы газа водорода. Химическая реакция на цинковом электроде, сопровождаемая выделением свободных электронов, будет происходить непрерывно, и по внешней цепи, соединяющей цинковый электрод с медным, будут непрерывным потоком двигаться электроны, т. е. будет проходить постоянный электрический ток.

Чем меньше будет сопротивление внешней цепи, тем больше будет сила тока и тем быстрее будет протекать химическая реакция, разрушающая цинковый электрод.

Имея в виду, что условное направление электрического тока противоположно действительному движению электронов, мы можем определить направление тока во внешней цепи и в электролите. Во внешней цепи ток будет направлен от медного электрода к цинковому, а во внутренней цепи — от цинкового электрода к медному.

Различие между внешней и внутренней цепями состоит в том, что во внешней цепи ток представляет собой движение электронов, а во внутренней цепи переносчиками электрических зарядов являются положительные и отрицательные ионы, двигающиеся во взаимно противоположных направлениях.

28. МЕСТНЫЕ ТОКИ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТА

Выше мы говорили, что в то время, когда внешняя цепь элемента не замкнута, цинковый электрод не должен разъедаться серной кислотой. В действительности же так бывает только в том случае, если электрод изготовлен из химически чистого цинка. Практически же почти всегда на поверхности цинкового электрода имеются посторонние примеси в виде мельчайших частиц других металлов. Эти частицы совместно с цинком образуют микроскопические гальванические элементы, действующие непрерывно и разрушающие поверхность цинкового электрода даже тогда, когда к зажимам элемента не присоединено никакой нагрузки. Такое разрушающее действие примесей в некоторой степени можно предотвратить амальгамированием цинкового электрода.

Элемент может служить источником тока до тех пор, пока не разрушится весь цинковый электрод, превратившись в сер-

нокислый цинк. Однако в действительности описанный нами элемент перестанет работать гораздо раньше вследствие так называемой **поляризации**.

Явление поляризации состоит в том, что водород, выделяющийся у положительного электрода, покрывает его слоем мельчайших пузырьков, преграждая путь положительным ионам к медному электроду. Вследствие этого возрастает внутреннее сопротивление элемента и уменьшается сила тока, которую он может отдавать. Кроме того, слой водорода совместно с металлом электрода создает как бы другой элемент, э. д. с. которого направлена против э. д. с. гальванического элемента.

Для устранения явления поляризации положительный электрод окружают слоем какого-либо вещества (**деполяризатора**), хорошо проводящего ток и вместе с тем сильно поглощающего водород. В современных гальванических элементах в качестве деполяризаторов применяются вещества твердые, жидкие и газообразные. К твердым деполяризаторам относятся перекись марганца и окись меди. Твердые деполяризаторы обычно применяются в виде порошкообразной смеси их с другим веществом, являющимся хорошим проводником электричества, например с порошком графита. Жидкими деполяризаторами являются растворы сернокислой меди и двухромокислого калия. В качестве газообразного деполяризатора может служить кислород воздуха.

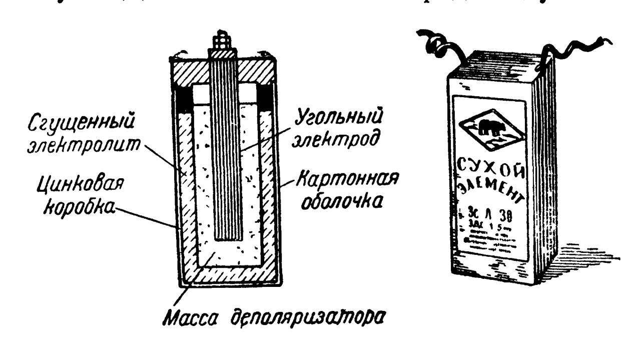
29. ТИПЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Наиболее распространенными являются водоналивные элементы, сухие элементы и элементы с воздушной деполяризацией.

Положительным электродом как в водоналивном, так и в сухом элементе служит угольная палочка, а отрицательным — цинк. Электролитом является 15%-ный раствор нашатыря (хлористого аммония) в воде. Положительный электрод окружен слоем деполяризатора, состоящего из порошкообразной смеси перекиси марганца с графитом (фиг. 52) Отрицательный электрод изготовляется в виде прямоугольной или цилиндрической цинковой банки, в которую и наливается электролит.

Отличие сухого элемента от водоналивного состоит в том, что электролитом в нем служит густая паста, увлажняющаяся при работе элемента за счет воды, выделяющейся у угольного электрода в процессе деполяризации.

В элементах с воздушной деполяризацией, как показывает само название, в качестве деполяризатора используется кислород воздуха. Для того чтобы кислород воздуха мог легче



Фиг. 52. Гальванический элемент.

проникать через пористую массу угольного электрода, угольный электрод делается полым.

30. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА, НАПРЯЖЕНИЕ, ЕМКОСТЬ

Одной из существенных характеристик элемента является развиваемая им э. д. с. Электродвижущая сила элемента зависит исключительно от материалов, из которых изготовлены электроды, и от состава электролита. От размеров же электродов и от количества электролита э. д. с. элемента совершенно не зависит.

Различные типы элементов развивают э. д. с. от 1 до 2 *в*.

Для определения э. д. с. элемента следует измерять ее тогда, когда элемент не нагружен внешней цепью.

Вторая не менее важная характеристика гальванического элемента — его внутреннее сопротивление. Гальванический элемент, как и всякий источник тока, обладает некоторым внутренним сопротивлением. Если внутреннее сопротивление элемента велико, то на нем будет происходить значительное падение напряжения.

Рабочее напряжение, т. е. напряжение, измеренное на зажимах элемента при присоединенной нагрузке, будет тем меньше, чем больше падение напряжения внутри элемента.

Так как сила тока в цепи везде одна и та же, то падение напряжения во внешней и внутренней цепях будут пропорциональны сопротивлениям этих цепей. Если, например, внутрен-

нее сопротивление элемента составляет $^1/_5$ часть общего сопротивления всей замкнутой цепи, то и падение напряжения внутри элемента будет составлять $^1/_5$ часть от его э. д. с. Следовательно, рабочее напряжение будет равно только $^4/_5$ э. д. с. элемента.

Из сказанного следует, что чем меньше внутреннее сопротивление элемента, тем меньше разница между э. д. с. и рабочим напряжением элемента.

Внутреннее сопротивление элемента зависит, во-первых от размеров электродов и от расстояния между ними. Чем больше электроды и чем меньше расстояние между ними, тем меньше внутреннее сопротивление элемента. Кроме того, внутреннее сопротивление элемента увеличивается вследствие поляризации. И, наконец, внутреннее сопротивление элемента зависит от вещества электролита и от его концентрации (крепости раствора).

Третьей существенной характеристикой свойств элемента является его **емкость**. Не следует смешивать емкость элемента с емкостью конденсатора. Емкостью элемента называется количество электричества, которое проходит через него за все время его службы, при условии, что разряд производится нормальным рабочим током.

Емкость элемента измеряется в амперчасах (*ач*). Если, например, элемент может проработать 1 000 час. при нормальном разрядном токе, равном 0,2 *а*, то его емкость равна:

$$1\,000 \cdot 0{,}2 = 200 \text{ ач.}$$

Емкость элемента и сила рабочего тока в основном зависят от его размеров, т. е. от размеров электродов и количества электролита. На емкость существенное влияние оказывает также наличие в элементе поляризации.

Если разряжать элемент током выше нормального, то он быстро поляризуется и перестает работать, но «отдохнув», он начинает работать вновь. При систематическом разряде элемента током чрезмерно большой силы его емкость заметно уменьшается.

При проверке качества элемента всегда следует измерять его напряжение под нагрузкой, так как при холостом ходе даже разряженный элемент показывает напряжение, равное э. д. с.

Следует обращать внимание также на дату изготовления элемента, так как элемент расходуется даже тогда, когда он не работает. При повышении температуры разрушение эле-

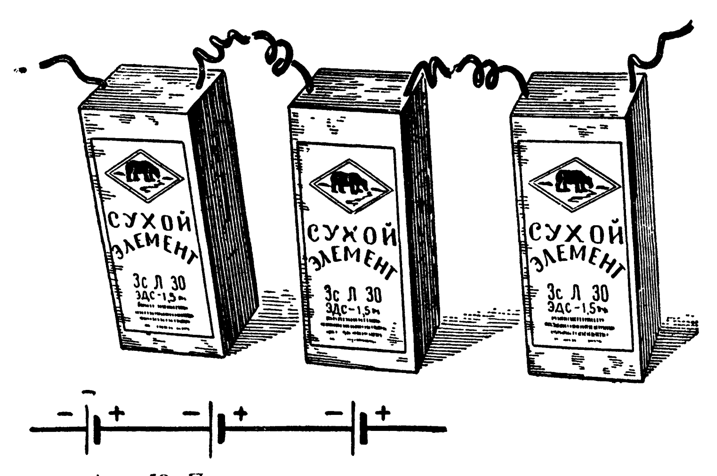
мента местными токами происходит более интенсивно. Поэтому элементы следует хранить в холодном, но сухом месте.

При хранении элементов и при работе с ними нужно обращать внимание на чистоту зажимов. Чистые контакты обеспечивают хорошее соединение с проводами и позволяют всегда иметь нормальное рабочее напряжение.

31. СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В БАТАРЕИ

Элементы можно соединять между собой параллельно, последовательно и смешанно в батареи гальванических элементов.

Последовательным соединением элементов называется такое, при котором плюс одного элемента соединяется с мину-



Фиг. 53. Последовательное соединение элементов.

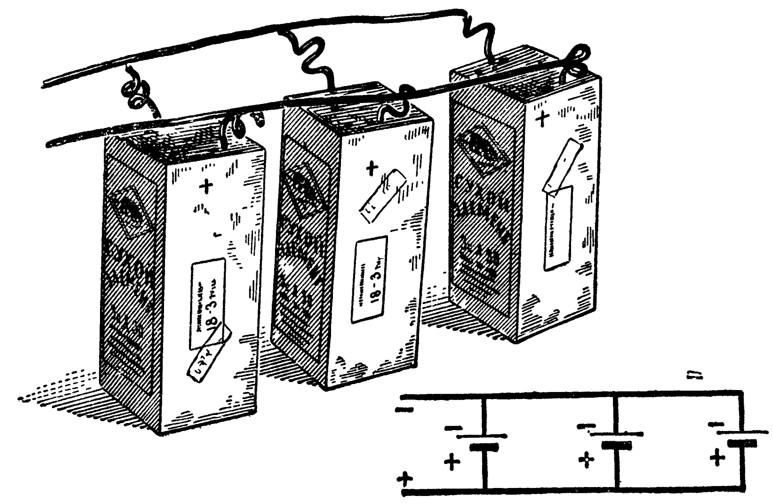
Плюс предыдущего элемента соединен с минусом следующего. При последовательном соединении увеличивается напряжение.

сом второго, а плюс второго с минусом третьего и т. д. Последовательное соединение элементов схематически изображено на фиг. 53.

Электродвижущая сила батареи, составленной из нескольких последовательно соединенных элементов, равна сумме э. д. с. всех элементов, входящих в батарею. Внутреннее сопротивление такой батареи будет равно сумме внутренних сопротивлений всех элементов. Емкость же батареи в амперчасах будет равна емкости одного элемента, так как при данном разрядном токе один элемент сможет проработать столь-

ко же времени, сколько и вся батарея. Это, конечно, относится к тому случаю, когда батарея составлена из однотипных элементов.

Последовательное соединение элементов применяется в тех случаях, когда нужно иметь напряжение больше, чем это может дать один элемент, например, при составлении так называемых анодных батарей (40 ÷ 120 *в*) и батарей накала (2 ÷ ÷ 6 *в*).



Фиг. 54. Параллельное соединение элементов.

Плюсы всех элементов соединены в одной общей точке, а минусы — в другой общей точке. При параллельном соединении увеличивается емкость.

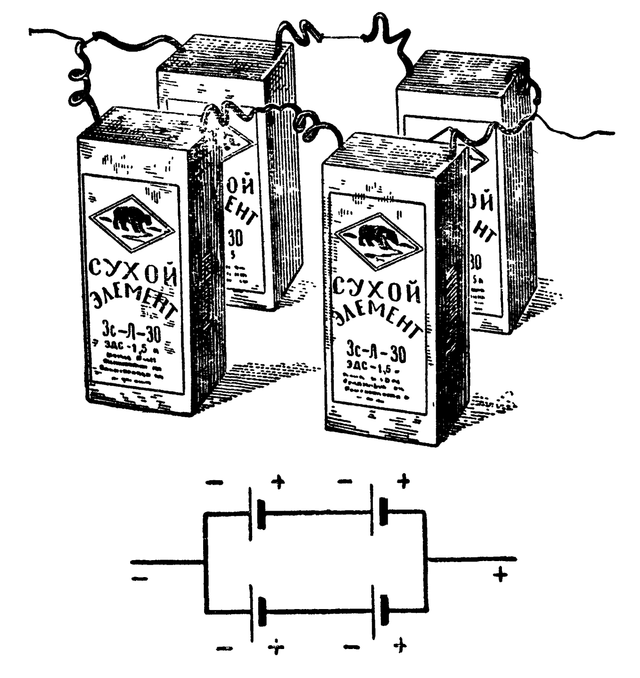
Параллельным соединением элементов называется такое, при котором плюсы всех элементов соединяются в одной общей точке, а минусы всех элементов — в другой общей точке (фиг. 54).

Электродвижущая сила батареи, составленной из параллельно соединенных однотипных элементов, равна э. д. с. одного элемента. Внутреннее сопротивление такой батареи меньше сопротивления одного элемента во столько раз, сколько соединено элементов, а емкость батареи равна сумме емкостей всех соединенных элементов.

Если от батареи требуется не только большая э. д. с., но и большая емкость, то применяется смешанное соединение элементов (фиг. 55).

При смешанном соединении однотипных элементов э. д. с.

батареи равна сумме э. д. с. элементов, входящих в одну последовательную группу, а емкость батареи равна сумме емкостей всех последовательных групп, соединенных между собой параллельно. Внутреннее сопротивление батареи при смешанном соединении равно внутреннему сопротивлению одного



Фиг. 55. Смешанное соединение элементов.

При смешанном соединении увеличиваются и напряжение и емкость.

элемента, умноженному на число элементов, соединенных последовательно, и деленному на число групп, соединенных параллельно.

Пример 20. Вычислите э. д. с., внутреннее сопротивление и емкость батареи, составленной из 20 элементов. Число элементов в одной последовательной группе равно пяти, а число последовательных групп, соединенных параллельно, равно четырем.

Электродвижущая сила одного элемента равна 1,45 *в*, внутреннее сопротивление — 1 *ом* и емкость — 20 *ач*.

Решение:

1) $E = 1{,}45 \cdot 5 = 7{,}25$ *в*.

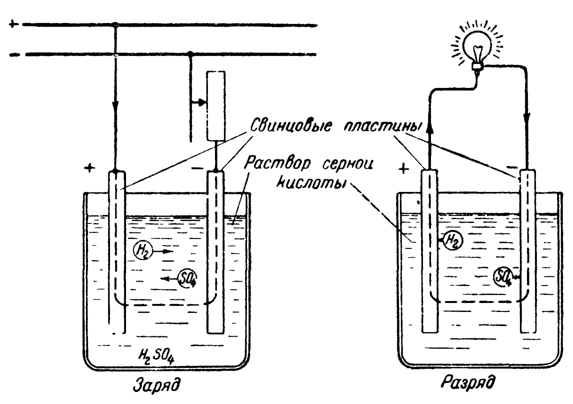
2) $r = 1 \cdot 5 : 4 = 1{,}25$ *ом*.

3) Емкость $= 20 \cdot 4 = 80$ *ач*.

32. КИСЛОТНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Гальванический элемент может служить источником тока только до тех пор, пока не израсходуется весь запас заключенной в нем химической энергии.

Электрические аккумуляторы отличаются от гальванических элементов тем, что накопление (аккумулирование) в них химической энергии производится путем пропускания через них электрического тока в обратном направлении. Пропускание электрического тока через аккумулятор в обратном направлении называется зарядом аккумулятора. При заряде



Фиг. 56. Простейший аккумулятор — две свинцовые пластины в растворе серной кислоты.

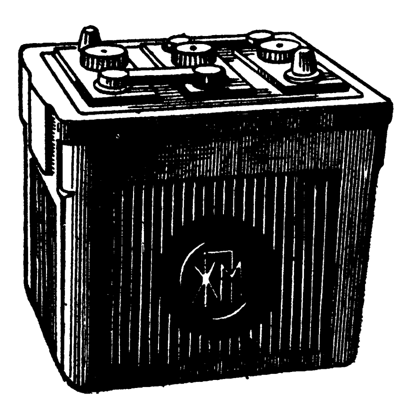
аккумулятора происходит превращение электрической энергии в химическую, а при разряде — обратный процесс. Процесс заряда и разряда аккумулятора может производиться очень большое число раз без понижения работоспособности аккумулятора.

Простейший аккумулятор состоит из двух свинцовых пластин, погруженных в раствор серной кислоты (фиг. 56). Под действием серной кислоты поверхность свинцовых пластин покрывается тонким слоем сернокислой соли свинца.

При заряде такого аккумулятора, т. е. при пропускании через него постоянного электрического тока от постороннего источника, например от динамомашины, раствор серной кислоты разлагается. При этом на поверхности одной из пластин образуется перекись свинца, представляющая собой химическое соединение свинца с кислородом. Поверхность же другой

пластины очищается от пленки сернокислой соли свинца. Пластина с перекисью свинца будет служить положительным электродом (так же как в гальванических элементах медь или уголь), а чисто свинцовая пластина — отрицательным электродом.

Если присоединить к зажимам аккумулятора какую-либо нагрузку (внешнюю цепь), то через нее потечет ток от положительной пластины к отрицательной и аккумулятор начнет разряжаться. Во время разряда в аккумуляторе, так же как и в гальваническом элементе, происходят химические реакции. Перекись свинца на положительной пластине постепенно превращается снова в сернокислую соль свинца, а отрицательная пластина вновь покрывается сернокислой солью свинца. К концу этого процесса развиваемая аккумулятором э. д. с. заметно падает.



Фиг. 57. Аккумуляторная батарея.

Емкость аккумулятора всецело зависит от количества образовавшейся перекиси свинца, последняя же в простейшем аккумуляторе получается только на поверхности пластины. Следовательно, для получения большой емкости необходимо брать пластины больших размеров. Однако, при этом размеры аккумулятора получаются очень велики.

Современные кислотные аккумуляторы устраиваются таким образом, чтобы в химических реакциях участвовали не только поверхности пластин, но и вся их масса; достигается это особой конструкцией пластин. Благодаря этому емкость аккумулятора значительно повышается, тогда как общие его размеры остаются сравнительно небольшими.

В большинстве случаев отрицательная пластина делается из губчатого свинца (серого цвета), а положительная — из перекиси свинца (красновато-коричневого цвета). Оба эти вещества запрессовываются в отверстия свинцовых решеток. Отрицательных пластин всегда берется на одну больше, чем положительных. Пластины располагаются на небольшом расстоянии одна от другой, поэтому внутреннее сопротивление аккумуляторов получается очень малым.

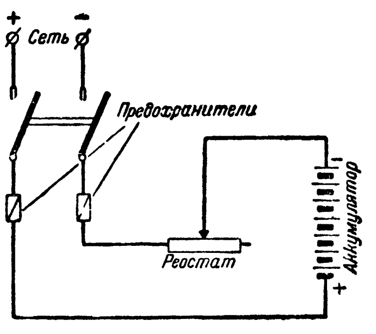
Рабочее напряжение одной банки заряженного аккумулятора равно 2 *в*.

Аккумуляторная батарея составляется из нескольких банок, соединенных между собой последовательно для получения большего напряжения.

В радиотехнике применяются аккумуляторные батареи двух видов — анодные и накальные. Анодные батареи обеспечивают напряжение до 80 *в*, а накальные — до 6 *в*. Внешний вид накальной аккумуляторной батареи изображен на фиг. 57.

33. ЗАРЯД И РАЗРЯД

Для заряда аккумуляторной батареи ее положительный полюс следует соединить с положительным зажимом зарядной цепи, а отрицательный полюс — с отрицательным зажимом зарядной цепи (фиг. 58). Сила зарядного тока, выраженная в амперах, не должна превышать 10% емкости аккумулятора, выраженной в амперчасах. Чересчур быстрый заряд влечет за собой увеличение осадка на дне аккумулятора, что уменьшает его емкость и общий срок службы. При заряде аккумуляторной батареи током, равным 10% от ее емкости, продолжительность заряда должна быть не менее 10 час., а лучше всего часов 12—15. При меньшей силе зарядного тока продолжительность заряда соответственно увеличивается. В последней фазе заряда сила зарядного тока должна быть понижена.



Фиг. 58. Схема заряда аккумуляторов.

В конце заряда аккумулятор начинает «кипеть» вследствие бурного выделения водорода из электролита. Напряжение каждой банки аккумулятора, равное в начале заряда 2 *в*, по мере заряда постепенно повышается, достигая в конце его 2,7—2,8 *в*. Поэтому источник тока, от которого производится заряд аккумуляторной батареи, должен иметь напряжение из расчета не менее чем по 2,8 *в* на каждую заряжаемую банку. Например, напряжение источника тока для зарядки 80 *в* анодной батареи, состоящей из 40 банок, должно быть не менее 2,8 · 40=112 *в*. Аккумуляторы, соединяемые для зарядки последовательно, должны иметь одинаковую емкость. В про-

тивном случае аккумуляторы, имеющие меньшую емкость, будут перегружаться слишком сильным зарядным током; наоборот, аккумуляторы, обладающие большей емкостью, не сумеют зарядиться.

Вследствие потерь при заряде и разряде отдача аккумулятора бывает всегда меньше 100%. Это значит, что при заряде приходится затрачивать больше энергии, чем та, которая потом получается при разряде.

Произведение разрядного тока на время разряда называется емкостью аккумулятора. Емкость аккумулятора измеряется в амперчасах. Так, например, аккумуляторная батарея емкостью в 16 *ач* может разряжаться током 2 *а* в течение 8 час. или током в 1 *а* в течение 16 час. Если разряд аккумулятора производится током выше нормального, то его емкость понижается. Если разрядный ток меньше нормального, то емкость аккумулятора несколько увеличивается. Нормальным временем разряда обычно считается 10—20 час. Емкость аккумулятора обычно проставляется на самом аккумуляторе.

Аккумулятор никогда нельзя разряжать до такой степени, чтобы активная масса пластин превратилась в сернокислую соль свинца (сульфат). Необходимо возобновить заряд аккумулятора, прежде чем он достигнет такого состояния; в противном случае он будет испорчен.

Чем сильнее разряжен аккумулятор, тем большая часть активной массы превращается в сульфат. Это явление называется сульфатацией и является наиболее частой причиной гибели аккумуляторов. Если аккумулятор оставить в разряженном состоянии на длительный срок, то потом будет очень трудно превратить сульфат обратно в активную массу. Особенно плохим для аккумулятора будет такое положение, когда пластины оказываются сухими в результате испарения или вытекания электролита. При заряде такого аккумулятора часть сульфата вместо обратного превращения в активную массу выкрашивается из пластин и падает на дно банки. Эта часть массы уже потеряна для работы.

В нормальных условиях работы все аккумуляторы дают небольшой осадок. Обычно в банке снизу под пластинами предусматривается место для сбора этого осадка. Когда же аккумулятор засульфатирован и осадок становится непомерно большим, он уже не помещается под пластинами и может вызвать замыкание их между собой.

Регулярные своевременные заряды и разряды предотвращают сульфатацию.

Разрядный ток аккумулятора в амперах не должен превышать 10% емкости, выраженной в амперчасах. Безусловно, недопустимо замыкание аккумулятора накоротко, т. е. соединение проводником положительного полюса с отрицательным, так как короткое замыкание быстро губит аккумулятор. Разряд аккумулятора можно производить только до тех пор, пока его напряжение не упало до 1,8 *в* на банку. После этого он должен быть немедленно поставлен на зарядку.

34. УХОД ЗА АККУМУЛЯТОРАМИ

Состояние аккумуляторов обычно определяется по плотности электролита. Дело в том, что в процессе разряда часть серной кислоты превращается в воду. Это понижает плотность электролита. Поэтому путем измерения плотности электролита можно судить о том, как далеко зашел разряд. Плотность электролита измеряется ареометром (фиг. 59). Этот прибор действует на том принципе, что плавающий предмет погружается глубже в слабый раствор (электролит малой плотности), чем в крепкий раствор (электролит большой плотности). Ареометр состоит из стеклянного поплавка, находящегося внутри стеклянной трубки. На одном конце стеклянной трубки имеется резиновая груша. При помощи груши электролит всасывается в трубку. Стеклянный поплавок всплывает в электролите. Глубина погружения поплавка в электролит показывает плотность последнего. На поплавке нанесены деления для непосредственного отсчета плотности электролита. Чистая вода имеет плотность 1. Чистая серная кислота имеет плотность 1,835.

Фиг. 59. Груша с ареометром.

В слабый электролит ареометр погружается больше, в плотный — меньше.

Нормальная плотность электролита в полностью заряженном переносном аккумуляторе должна быть в пределах между 1,27 и 1,29, а его напряжение должно быть немного больше 2 *в*. Напряжение не зависит от емкости и размеров аккумулятора. Плотность электролита в разряженном аккумуляторе — около 1,15, а напряжение на зажимах — около 1,8 *в*. Однако, как правило, аккумулятор не следует разряжать до такой степени, чтобы плотность его электролита падала ниже 1,17.

Серная кислота входит в химическое соединение почти со всеми металлами. Поэтому ее нельзя держать в металлической посуде, за исключением свинцовой.

Всякая вода, кроме дестиллированной и дождевой, содержит примеси, которые могут испортить электролит. Приготовляя электролит или добавляя воду в него, следует всегда применять только дестиллированную воду.

Аккумуляторная батарея поддерживается в хорошем состоянии постоянным уходом. Батарею следует ставить на зарядку, не дожидаясь полного разряда.

Время от времени следует доливать дестиллированную воду, чтобы электролит покрывал пластины полностью. При понижении уровня электролита на сухой части пластин будет образовываться сульфат, а остальная часть пластин, погруженная в электролит, будет перегружена током.

При добавлении в электролит воды увеличивается опасность замерзания аккумулятора в зимнее время; поэтому не следует добавлять воду в аккумулятор, если он оставляется без нагрузки на длительное время, особенно при низкой температуре. При замерзании электролита растрескиваются банки, разрушается активная масса и портятся разделительные перегородки (сепараторы). Разряженная батарея замерзает быстрее заряженной, так как электролит в ней содержит меньше кислоты и больше воды, чем заряженная.

Приготовляя электролит для аккумуляторов, нельзя лить воду в кислоту. Нужно обязательно лить кислоту в воду. При вливании кислоты в воду выделяется тепло, поэтому сосуд, в котором составляется электролит, должен выдерживать нагревание. Кислоту следует лить в воду медленно, помешивая раствор стеклянной палочкой или специально приготовленной деревянной лопаточкой, чтобы выделяющееся тепло рассеивалось по всей массе жидкости. Для приготовления электролита лучше всего применять стеклянные или эбонитовые сосуды.

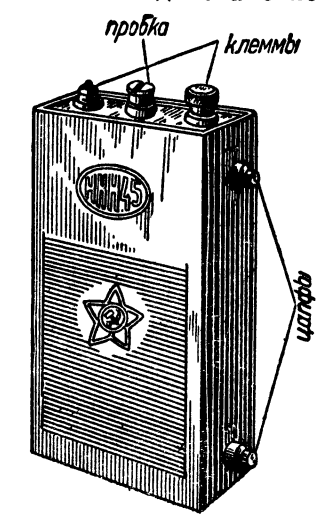
Смесь водорода, выделяющегося из аккумулятора, с кислородом воздуха легко воспламеняется, причем это часто сопровождается взрывом. Поэтому комнату, где содержатся аккумуляторы, следует тщательно вентилировать. Огонь в этой комнате не следует зажигать ни при каких обстоятельствах.

При обращении с аккумуляторами необходимо надевать резиновый фартук, чтобы предохранить одежду от порчи. Следует остерегаться попадания электролита на незащищенные

части тела. Необходимо всегда иметь под рукой раствор нашатырного спирта или соды для нейтрализации пролитого электролита и предотвращения ожогов на теле.

35. ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Пластины щелочных аккумуляторов выполнены в виде железных решеток, заполненных активной массой. Банка аккумулятора изготовляется также из железа и соединена с положительным полюсом аккумулятора (фиг. 60).



Фиг. 60. Щелочной аккумулятор.

Электролитом служит раствор в дестиллированной воде химически чистого едкого калия или едкого натрия. Едкий калий и едкий натрий принадлежат к группе так называемых щелочей, откуда и произошло название этого типа аккумуляторов. Плотность электролита берется в пределах 1,18—1,20.

Хранить едкий калий нужно в запаянной железной банке, так как он портится на открытом воздухе. С этой же целью после заливки аккумулятора электролитом в банку необходимо пустить несколько капель вазелинового масла, которое, покрыв тонким слоем поверхность электролита, предохранит его от соприкосновения с воздухом.

Ни в коем случае нельзя заливать щелочные аккумуляторы кислотой, так как это ведет к их гибели. Нельзя также вести зарядку щелочных аккумуляторов в одном помещении с кислотными аккумуляторами.

Заряд можно производить гораздо более сильным током, чем в случае кислотных аккумуляторов. Сила зарядного тока может достигать $^1/_4$ от емкости аккумулятора. Нормальная продолжительность заряда при этом равна 6 час.

Напряжение одной банки в начале заряда равно 1,4 *в*, к концу же заряда оно повышается до 1,8 *в*. Среднее напряжение, даваемое одной банкой, при разряде равно 1,2 *в*. Разряд может производиться до тех пор, пока напряжение не упадет до 1,1 *в* на банку. После этого аккумулятор нужно отправить в зарядку.

Щелочной аккумулятор менее чувствителен к коротким замыканиям к разряду током выше нормального.

В аккумуляторной батарее, состоящей из нескольких элементов, соединенных последовательно, банки соседних элементов не должны соприкасаться между собой. Недопустимо также попадание металлических предметов в промежутки между банками.

Все правила, приведенные выше в отношении хранения кислотных аккумуляторов, действительны и для щелочных аккумуляторов.

36. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как действует гальванический элемент?
2. Чем отличается электрический ток во внешней цепи от тока внутри элемента?
3. От чего зависит срок службы элемента?
4. Что такое поляризация элемента?
5. Для чего служит деполяризатор?
6. Чем отличается сухой элемент от водоналивного?
7. От чего зависит э. д. с. элемента?
8. Чем обусловлено внутреннее сопротивление элемента?
9 От чего зависит емкость элемента?
10. Почему рабочее напряжение на зажимах элемента отличается от его э. д. с.?
11. В чем разница между последовательным и параллельным соединением элементов?
12. В чем состоит основное отличие аккумулятора от гальванического элемента?
13. Как действует простейший кислотный аккумулятор?
14. Каковы основные правила заряда и разряда аккумуляторов?
15. Что такое сульфатация?
16. Для чего служит ареометр и как им пользуются?
17. Каковы основные правила ухода за аккумуляторами?
18. Какие предосторожности необходимо соблюдать при обращении с аккумуляторами?
19. Чем отличаются щелочные аккумуляторы от кислотных?
20. Каковы основные правила обращения с щелочными аккумуляторами?

ГЛАВА ПЯТАЯ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

37. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

В первой главе этой книги мы познакомились с электрическим полем, которое сопутствует статическому (неподвижному) электричеству.

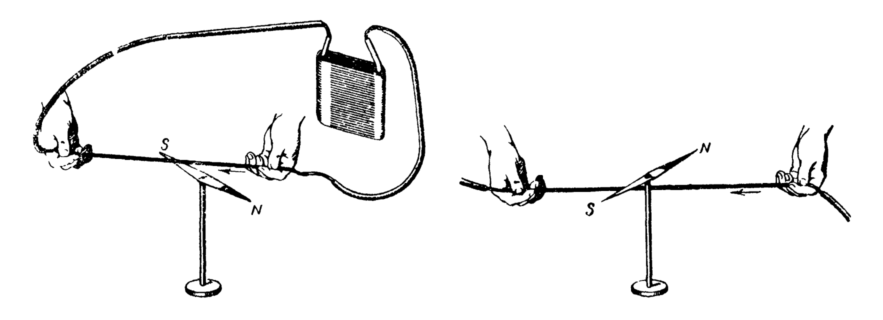
Читая вторую главу книги, мы узнали, что в электрическом поле сосредоточена вся энергия взаимодействия электриче-

ских зарядов, и познакомились с устройствами для накопления этой энергии.

В третьей главе мы видели, как под влиянием разности потенциалов электрического поля приходят в движение свободные электроны в проводниках, образуя электрический ток.

Теперь нам предстоит познакомиться с магнитным полем электрического тока.

Разница между энергией электрического поля и энергией магнитного поля примерно такая же, как между энергией, запасенной путем подъема какого-либо груза на высоту (потен-



Фиг. 61. Взаимодействие тока и магнитной стрелки.

При поднесении магнитной стрелки к проводнику сверху она отклоняется в одну сторону а при поднесении снизу — в другую.

циальная энергия), и энергией движения этого груза, когда он падает вниз (кинетическая энергия)

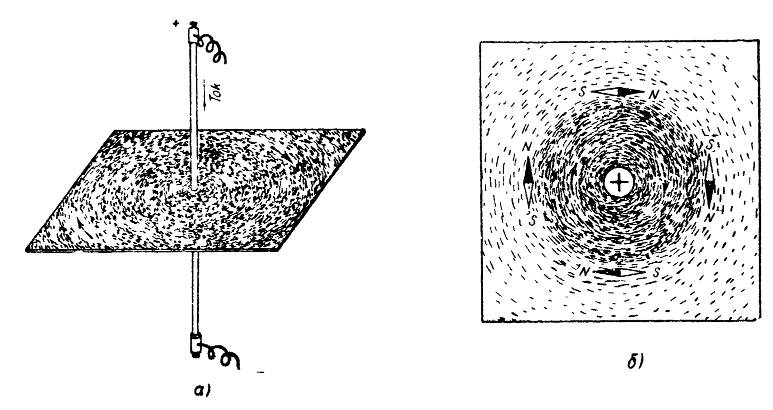
Магнитное поле создается вокруг электрических зарядов при их движении. Так как движение электрических зарядов представляет собой электрический ток, то вокруг всякого проводника с током всегда существует магнитное поле.

Чтобы убедиться в существовании этого поля, поднесем сверху к проводнику, по которому протекает электрический ток, обыкновенный компас. Стрелка компаса тотчас же отклонится в сторону. Поднесем компас к проводнику с током снизу — стрелка компаса отклонится в другую сторону (фиг. 61).

Убедившись в существовании вокруг проводника магнитного поля, т. е. пространства, где действуют магнитные силы, ознакомимся со свойствами этого поля. Насыплем на лист картона тонкий слой железных опилок и пропустим через него проводник с током (фиг. 62,*а*). Опилки расположатся вокруг

проводника правильными концентрическими[1] окружностями. Линии, образованные опилками, совпадают с силовыми линиями магнитного поля. Таким образом, оказывается, что магнитные силовые линии не имеют ни начала, ни конца, а являются замкнутыми.

Стрелка компаса, помещенная в магнитное поле, всегда располагается вдоль магнитных силовых линий, причем ее северный (зачерненный) полюс показывает направление магнитных силовых линий в данной точке поля (фиг. 62,*б*).



Фиг. 62. Магнитное поле тока.

а — Железные опилки располагаются вокруг проводника с током концентрическими окружностями. *б* — Стрелка компаса всегда повертывается вдоль магнитных силовых линий.

Свойства магнитных силовых линий имеют некоторые общие черты со свойствами электрических силовых линий. Во-первых, магнитные силовые линии стремятся сократить свою длину (как растянутые резиновые нити); во-вторых, магнитные силовые линии одного направления отталкиваются друг от друга и, наконец, магнитные силовые линии, противоположно направленные, притягиваются и взаимно уничтожают друг друга.

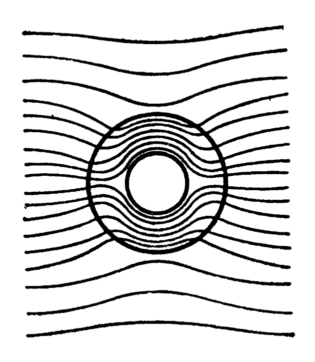
Магнитные силовые линии проходят через железо гораздо легче, чем через воздух и другие вещества. Если поместить железный пустотелый шар в магнитное поле, созданное, например, постоянным магнитом (фиг. 63), то магнитные силовые

[1] Концентрическими окружностями называются окружности, имеющие один общий центр.

линии пройдут через оболочку этого шара, не попадая в его внутреннюю полость.

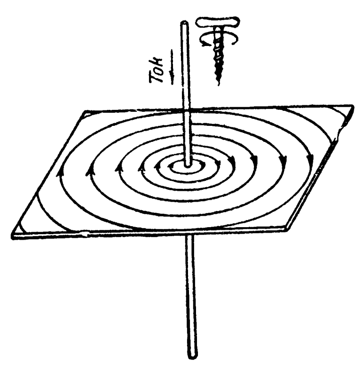
Этим свойством магнитных силовых линий пользуются в радиотехнике для защиты элементов схемы, например, трансформаторов, катушек и пр., от влияния со стороны внешних магнитных полей. Такая защита называется антимагнитным экранированием.

Силу магнитного поля или, как говорят, его напряженность оценивают по густоте магнитных силовых линий



Фиг. 63. Экранирование от магнитных полей.

Магнитные силовые линии проходят через оболочку пустотелого железного шара, не попадая в его внутреннюю полость.



Фиг. 64. Способ буравчика.

Направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока, а направление вращения —с направлением магнитных силовых линий.

в данной точке поля. Напряженность магнитного поля обозначают в формулах буквой *H*. Она показывает число силовых линий магнитного поля, проходящих через 1 *см*² поперечного сечения поля.

Магнитные силовые линии, пронизывающие какую-либо площадку, называются магнитным потоком через эту площадку. Магнитный поток через данную площадку будет, следовательно, тем больше, чем больше силовых линий проходит через нее. Магнитный поток обозначают буквой Ф.

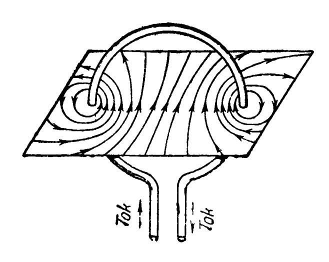
Направление магнитных силовых линий связано с направлением тока в проводнике. Наиболее простым способом определения направления магнитных силовых линий является способ буравчика (фиг. 64).

Способ буравчика состоит в следующем: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике,

то направление вращения буравчика совпадает с направлением магнитных силовых линий.

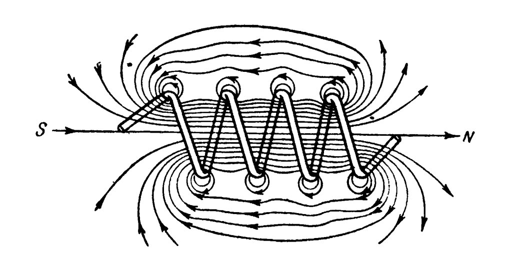
Придадим проводнику с током форму кольца (фиг. 65). Пользуясь правилом буравчика, мы легко установим, что магнитные силовые линии, создаваемые всеми участками проводника, имеют внутри кольца одинаковое направление. Значит, внутри кольца магнитное поле будет сильнее, чем снаружи.

Изготовим из проводника цилиндрическую спираль и пропустим по ней электрический ток (фиг. 66). Ток по всем витакам будет проходить в одном и том же направлении. Это будет равносильно тому, что мы поместим ряд кольцевых проводников на одну общую ось. Проводник, имеющий такую форму, называется соленоидом или катушкой.



Фиг. 65. Магнитное поле кольцевого тока.

Внутри кольца поле сильнее, чем снаружи.



Фиг. 66. Магнитное поле катушки.

Магнитное поле катушки равноценно полю, созданному несколькими кольцевыми токами.

Пользуясь правилом буравчика, мы легко установим, что магнитные силовые линии, создаваемые всеми витками катушки, имеют внутри нее одинаковое направление. Значит, внутри катушки будет более сильное магнитное поле, чем внутри одного витка. Между соседними витками катушки магнитные силовые линии направлены навстречу друг другу, и поэтому магнитное поле в этих местах будет очень ослаблено. Снаружи же катушки направление всех магнитных силовых линий будет одинаковым.

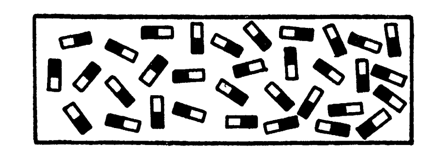
Магнитное поле катушки тем сильнее, чем больше сила тока, проходящего по ее виткам, и чем теснее, т. е. ближе друг к другу, расположены витки. Из двух катушек с одинаковым током и одинаковым числом витков более сильное поле имеет катушка, у которой витки расположены ближе друг к другу, т. е. катушка, имеющая меньшую осевую длину.

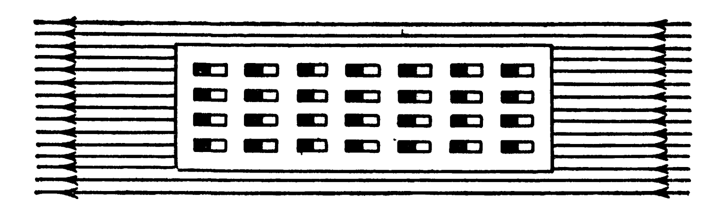
Произведение силы тока в амперах на число витков, носит название **ампервитков**.

Пользуясь этим термином, можно сказать, что магнитное поле катушки тем сильнее, чем больше ампервитков приходится на единицу ее осевой длины

38. ЖЕЛЕЗО В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При помещении в катушку железного стержня (сердечника) ее магнитный поток увеличивается во много раз. Объясняется это следующим Железо имеет кристаллическое строение. Отдельные кристаллы железа, вследствие того, что внутри





Фиг. 67. Железо в магнитном поле.

В обычном состоянии молекулярные магнитики железа расположены в беспорядке; в магнитном поле они повертываются вдоль магнитных силовых линий.

их происходит круговое движение электронов, т. е. существуют электрические токи, обладают свойствами маленьких магнитиков. В обычном состоянии эти молекулярные магнитики расположены в беспорядке. Магнитные поля их взаимно нейтрализуются, и поэтому кусок железа в целом не проявляет магнитных свойств. Схематически это изображено на фиг. 67. Отдельные молекулярные кристалики изображены в виде маленьких магнитиков.

При помещении железа в магнитное поле молекулярные магнитики подобно магнитной стрелке компаса поворачиваются на некоторый угол и устанавливаются вдоль силовых линий магнитного поля. Чем сильнее магнитное поле, тем большее

число молекулярных магнитиков поворачивается и тем однороднее становится их расположение. Поля одинаково ориентированных магнитов не нейтрализуют уже друг друга, а наоборот, складываются, создавая дополнительные силовые линии

Магнитный поток, создаваемый элементарными магнитиками железа, во много раз больше основного магнитного потока, создаваемого катушкой; именно поэтому магнитный поток катушки при помещении в нее железного сердечника увеличивается во много раз.

Если постепенно увеличивать ток, протекающий по виткам катушки, то магнитный поток в железном сердечнике будет увеличиваться до тех пор, пока все молекулярные магнитики не повернутся точно по направлению силовых линий магнитного поля (фиг. 67). После этого возрастание магнитного потока за счет железа прекратится. Это состояние железного сердечника называется магнитным насыщением.

Способностью увеличивать магнитный поток катушки обладают кроме железа и другие металлы (кобальт и никель), но у них эта способность выражена значительно слабее, чем у железа.

Очень сильными магнитными свойствами обладают также некоторые специальные сплавы. В радиотехнике эти сплавы применяются для изготовления постоянных магнитов для динамиков и магнетронов.

Число, показывающее, во сколько раз увеличивается магнитный поток соленоида при введении в него сердечника из какого-нибудь материала, называется магнитной проницаемостью данного материала и обозначается буквой μ.

Магнитная проницаемость некоторых сортов железа и специальных сплавов достигает нескольких сотен тысяч. Для большинства же материалов она близка к единице.

Произведение из напряженности магнитного поля H на проницаемость материала μ называется магнитной индукцией B. Таким образом $B = \mu H$.

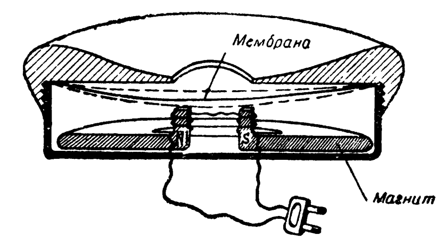
Магнитная индукция определяет количество силовых линий в данном материале, проходящих через 1 $см^2$ поперечного сечения материала.

После прекращения тока в катушке сердечник, если он сделан из мягкого железа, теряет свои магнитные свойства, потому что молекулярные магнитики снова располагаются беспорядочно. Если же сердечник стальной, то он сохраняет приобретенные магнитные свойства и после прекращения действия

на него магнитного поля катушки. Объясняется это тем, что в стали молекулярные магнитики сохраняют свое упорядоченное расположение и после прекращения тока в катушке.

Катушка с железным сердечником называется электромагнитом, так как ее магнитные свойства обусловлены электрическим током.

На принципе электромагнита основано устройство очень многих приборов, применяемых во всех отраслях техники. Мы ограничимся здесь рассмотрением принципа действия наиболее употребительных в радиотехнике приборов, а именно: телефонной трубки и электромагнитного громкоговорителя. Основными элементами телефонной трубки являются тонкая железная пластинка (мембрана) круглой формы (фиг. 68) и электромагнит. Сердечником электромагнита служит искусственный стальной магнит.



Фиг. 68. Принцип действия телефонной трубки.

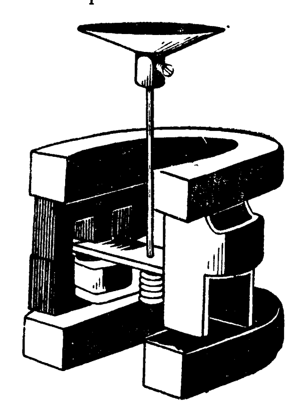
Переменное магнитное поле катушек поочередно то усиливает, то ослабляет притяжение мембраны к магниту. Колеблясь, мембрана воспроизводит звук.

Мембрана укреплена на небольшом расстоянии от полюсов (наконечников) электромагнита и под действием силы притяжения остается всегда несколько вогнутой в сторону магнита. При прохождении через обмотку электромагнита тока, сила которого меняется в течение секунды много раз, вокруг обмотки будет возникать переменное магнитное поле. Это поле, складываясь с магнитным полем постоянного магнита или вычитаясь из него, будет то усиливать, то ослаблять силу притяжения мембраны к электромагниту. В результате такого поочередного ослабления и усиления притяжения мембрана будет прогибаться в сторону магнита то больше, то меньше, т. е. будет совершать колебания. Таким образом, электрические колебания (колебания силы электрического тока в обмотке) превращаются в телефонной трубке в соответствующие им механические колебания мембраны. Колеблющаяся мембрана приводит в движение соприкасающийся с ней воздух, колебания которого воспринимаются нашим ухом как звук.

Для чего же необходим в телефоне постоянный магнит? Если бы постоянный магнит отсутствовал, то мембрана за один период колебания тока прогибалась бы два раза, и по-

этому частота ее колебаний была бы вдвое выше частоты колебаний тока в катушках телефона, т. е. звук был бы искажен. Кроме того, постоянный магнит увеличивает чувствительность телефона.

Устройство электромагнитного громкоговорителя типа «Рекорд» изображено на фиг. 69. Между одноименными полюсами двух магнитов зажат один конец упругого якоря (вибратора). Незакрепленный конец вибратора находится в промежутке между полюсными наконечниками магнитов. С вибратором при помощи жесткой проволочки (иглы) связан центр диффузора (бумажного конуса). На полюсные наконечники магнитов надеты две катушки (на фигуре для наглядности верхняя катушка снята), соединенные между собой таким образом, что магнитные потоки, создаваемые ими, складываются.



Фиг. 69. Схема устройства репродуктора „РЕКОРД".

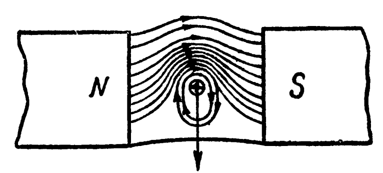
Переменное магнитное поле катушек поочередно помогает то верхнему, то нижнему магниту. Колебания якорька передаются диффузору, который и воспроизводит звук.

При отсутствии тока в катушках свободный конец якоря испытывает равное притяжение со стороны обоих магнитов и находится поэтому в среднем нейтральном положении. Если же по катушкам пропустить ток, то действие одного магнита ослабнет, а другого, наоборот, усилится и поэтому свободный конец якорька переместится из нейтрального положения в сторону наконечников того магнита, который в данный момент обладает большей силой притяжения. При перемене направления тока в катушках свободный конец якорька переместится в сторону другого наконечника. Таким образом, при каждой перемене направления тока якорек будет совершать колебания от одного наконечника к другому. Колебания якорька передаются при помощи иглы диффузору, а последний приводит в колебательное движение соприкасающийся с ним воздух.

39. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК

Поместим между полюсами магнита проводник, по которому протекает постоянный электрический ток. Мы тотчас же заметим, что проводник будет выталкиваться полем магнита из междуполюсного пространства.

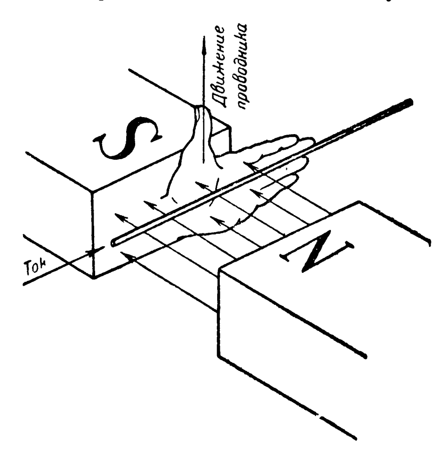
Объяснить это можно следующим образом. Вокруг проводника с током (фиг. 70) образуется собственное магнитное поле, силовые линии которого по одну сторону проводника направлены так же, как и силовые линии магнита, а по другую сторону проводника — в противоположную сторону. Вследствие этого с одной стороны проводника (на нашей фигуре сверху) магнитное поле оказывается сгущенным, а с другой его стороны (на нашей фигуре снизу)— разреженным. Поэтому проводник испытывает силу, давящую на него вниз. И если проводник не закреплен, то он будет перемещаться.



Фиг. 70. Действие магнитного поля на ток.

Магнитные силовые линии выталкивают проводник из междуполюсного пространства.

Для быстрого определения направления движения проводника с током в магнитном поле существует так называемое правило левой руки (фиг. 71). Это правило состоит в следующем: если поместить левую руку между полюсами магнита так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а четыре пальца руки совпадали с направлением тока в проводнике, то большой палец покажет направление движения проводника.



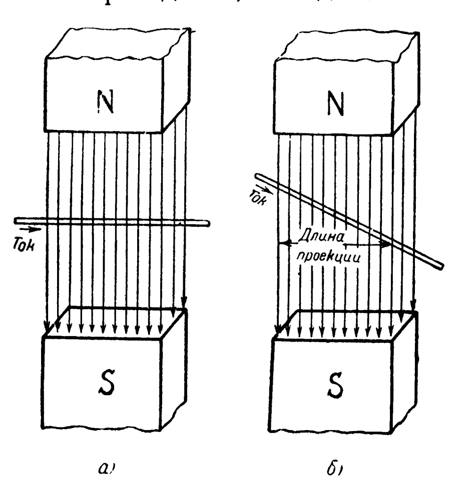
Фиг. 71. Правило левой руки.

Левая рука повернута ладонью навстречу магнитным силовым линиям, четыре пальца направлены вдоль тока, а большой палец показывает, куда будет двигаться проводник.

Итак, на проводник, по которому протекает электрический ток, действует сила, стремящаяся перемещать его перпендикулярно магнитным силовым линиям. Опытным путем можно определить величину этой силы. Оказывается, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, прямо пропорциональна силе тока в проводнике и длине той части проводника, которая находится в магнитном поле (фиг. 72,*а*).

Это правило справедливо, если проводник расположен под прямым углом к магнитным силовым линиям.

Если же проводник расположен не под прямым углом к магнитным силовым линиям, а, например, так, как изображено на фиг. 72,*б*, то сила, действующая на проводник, будет пропорциональна силе тока в проводнике и длине проекции части проводника, находящейся в магнитном поле, на плоскость, перпендикулярную магнитным силовым линиям. Отсюда следует, что если проводник параллелен магнитным силовым линиям, то сила, действующая на него, равна нулю. Если же проводник перпендикулярен направлению магнитных силовых линий, то сила, действующая на него, достигает наибольшей величины.



Фиг. 72. Сила взаимодействия магнитного поля и тока.

а — Сила взаимодействия пропорциональна длине части проводника, находящейся в магнитном поле; *б* — сила взаимодействия пропорциональна длине проекции части проводника, находящейся в магнитном поле, на плоскость, перпедикулярную магнитному потоку.

Сила, действующая на проводник с током, зависит еще и от магнитной индукции. Чем гуще расположены магнитные силовые линии, тем больше сила, действующая на проводник с током.

Подводя итог всему изложенному выше, мы можем действие магнитниго поля на проводник с током выразить следующим правилом:

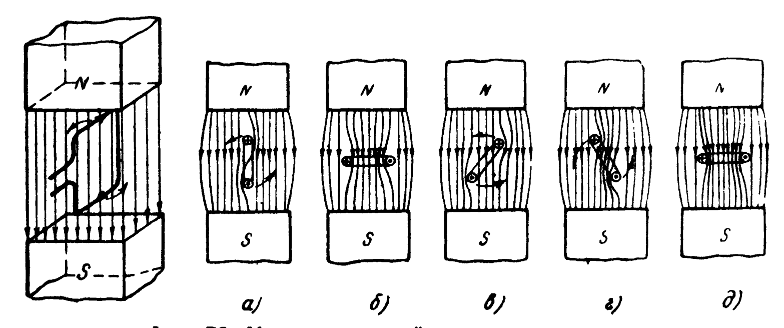
С и л а, д е й с т в у ю щ а я н а п р о в о д н и к с т о к о м, п р я м о п р о п о р ц и о н а л ь н а м а г н и т н о й и н д у к ц и и, с и л е т о к а в п р о в о д н и к е и д л и н е п р о е к ц и и ч а с т и п р о в о д н и к а, н а х о д я щ е й с я в м а г н и т н о м п о л е, н а п л о с к о с т ь, п е р п е н д и к у л я р н у ю м а г н и т н о м у п о т о к у.

Необходимо отметить, что действие магнитного поля на ток не зависит ни от вещества проводника, ни от его сечения. Действие магнитного поля на ток можно наблюдать даже при отсутствии проводника, пропуская, например, между полюсами магнита поток быстро несущихся электронов.

Действие магнитного поля на ток широко используется в

науке и технике. На использовании этого действия основано устройство электродвигателей, превращающих электрическую энергию в механическую, устройство магнитоэлектрических приборов для измерения напряжения и силы тока, электродинамических громкоговорителей, превращающих электрические колебания в звук, специальных радиоламп — магнетронов, катодно-лучевых трубок и т. д. Действием магнитного поля на ток пользуются для измерения массы и заряда электрона и даже для изучения строения вещества.

Оставляя в стороне большинство из этих чрезвычайно интересных вопросов, рассмотрим здесь лишь те из них, с кото-



Фиг. 73. Принцип устройства электромотора.

Рамка с током будет непрерывно вращаться в магнитном поле, если изменять направление тока в ней в моменты *б*, *д* и т. д.

рыми радиолюбителю наиболее часто приходится иметь дело в своей практике.

Принцип устройства электрического двигателя состоит в следующем. Если между полюсами магнита поместить проводник с током, согнутый в виде рамки (фиг. 73), то одна сторона рамки, находящаяся против северного полюса магнита, будет (по правилу левой руки) двигаться в одном направлении, а другая сторона, находящаяся против южного полюса магнита, будет двигаться в другом направлении, т. е. рамка будет поворачиваться вокруг своей оси. Поворачиваться она будет до тех пор, пока ее плоскость не займет положения, перпендикулярного направлению магнитного потока. Это положение рамки изображено на фиг. 73,*б*.

Если теперь переменить направление тока в рамке, то она будет продолжать свое вращение в прежнем направлении (фиг. 73,*в*). Изменяя направление тока в рамке каждый раз, когда ее плоскость становится перпендикулярно к магнитному

потоку (положения *б* и *д*), мы заставим рамку непрерывно вращаться в одном направлении.

Рамка, вращающаяся в магнитном поле, представляет собой простейший электрический двигатель, в котором энергия электрического тока превращается в механическую энергию. Первый двигатель такого типа создал в 1834 г. русский физик Б. С. Якоби.

В применяемых на практике электрических двигателях вместо рамки из одного витка устраивается несколько рамок, из которых каждая состоит из многих витков, а вместо постоянного магнита применяются электромагниты. В результате этих усовершенствований взаимодействие между магнитным полем и током получается более сильным. Для переключения направления тока в обмотках применяется особое устройство— коллектор, автоматически выполняющий необходимые переключения.

Рамку с током, помещенную в магнитном поле, можно использовать также для измерения силы постоянного тока. Электроизмерительные приборы, основанные на этом принципе, называются магнитоэлектрическими.

Устройство магнитоэлектрического прибора изображено на фиг. 74. Рамка этого прибора, помещенная в поле постоянного магнита, укреплена на оси, с которой связана легкая стрелка. Измеряемый ток пропускается по виткам рамки. Чем больше сила тока, тем на больший угол повернется рамка, преодолевая упругость пружинок, и тем больше делений покажет на шкале прибора связанная с рамкой стрелка. По прекращении тока в рамке она возвращается пружинками в исходное (нулевое) положение.

Такой прибор в зависимости от того, на какую силу тока он рассчитан, называется амперметром, миллиамперметром или, наконец, микроамперметром (гальванометром).

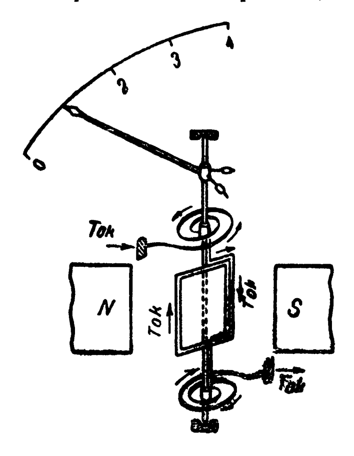
Этот же прибор может быть применен и для измерения напряжения. Для этого последовательно с прибором соединяют большое (известное) сопротивление, которое обычно монтируется в корпусе прибора. Такой прибор называется в о л ь т м е т р о м. Если присоединить вольтметр к точкам, между которыми требуется измерить напряжение (фиг. 47), то через вольтметр пойдет ток

$$I = \frac{U}{R_{пр}}.$$

Так как сопротивление прибора остается всегда одним и тем же, то сила тока, проходящего через рамку, а следова-

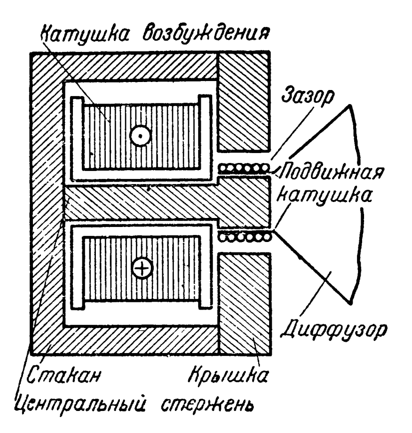
тельно, и угол ее поворота будут зависеть исключительно от измеряемого напряжения. Чем оно больше, тем на больший угол повернется рамка. На шкале прибора наносятся деления в вольтах.

Устройство электродинамического громкоговорителя изображено на фиг. 75. Внутри железного стакана помещен цилиндрический стержень, на который надета катушка возбуж-



Фиг. 74. Принцип действия магнитоэлектрических электроизмерительных приборов.

Угол поворота рамки прибора в магнитном поле тем больше, чем больше сила тока в рамке.



Фиг. 75. Разрез электродинамического громкоговорителя.

Подвижная катушка выталкивается из междуполюсного пространства электромагнита то в одну сторону, то в другую, в такт с протекающим по ней током низкой частоты. Вместе с катушкой колеблется диффузор, воспроизводящий звук.

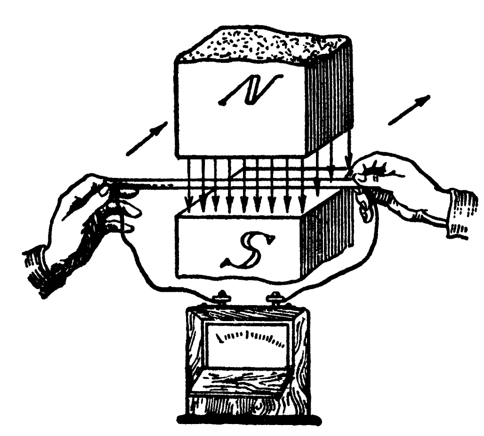
дения. Сверху стакан закрыт железной крышкой с круглым отверстием посредине. Диаметр этого отверстия несколько больше диаметра железного стержня; поэтому между крышкой стакана и стержнем получается кольцевая щель (зазор). В этом кольцевом зазоре помещена легкая катушка (звуковая), скрепленная с диффузором. По катушке возбуждения пропускается постоянный ток, намагничивающий стержень и стакан. Вследствие этого в кольцевом зазоре образуется сильное магнитное поле. Если теперь по звуковой катушке пропускать ток, сила и направление которого часто меняются (переменный ток звуковых частот), то звуковая катушка, прикрепленная к диффузору, будет выталкиваться из зазора то в одну сторону, то в другую (по правилу левой руки), т. е.

она будет колебаться в такт с изменениями силы и направления тока в ее обмотке. Колебания диффузора передаются соприкасающемуся с ним воздуху, а колебания последнего воспринимаются нашим ухом как звук.

Вместо железного стакана с подмагничивающей катушкой иногда применяют постоянный магнит из специального сплава, дающего большую индукцию в зазоре.

40. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Выше мы видели, что проводник с током, помещенный в магнитное поле, приходит в движение. Существует и другое очень важное явление, в известном смысле обратное только что описанному: при движении замкнутого проводника в магнитном поле в нем появляется электрический ток.



Фиг. 76. Электромагнитная индукция.

При быстром пересечении проводником магнитных силовых линий в проводнике возникает электрический ток.

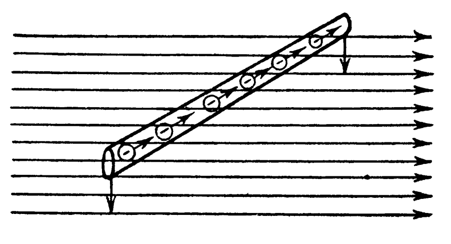
Возьмем проводник, концы которого замкнуты на гальванометр (прибор для обнаружения электрического тока), и быстро пересечем этим проводником поле магнита (фиг. 76). При этом мы заметим, что стрелка гальванометра отклонится в тот момент, когда проводник пересечет магнитное поле. Следовательно, по проводнику в этот момент пройдет электрический ток.

Пересечем теперь магнитное поле проводником в обратном направлении. Стрелка гальванометра снова отклонится, но уже в противоположную сторону. Это говорит о том, что по проводнику снова прошел электрический ток, но уже в обратном направлении.

Отсюда можно сделать вывод, что при пересечении проводником магнитного поля в проводнике возникает э. д. с., направление которой зависит от направления движения проводника. Эта э. д. с. называется индуктированной э. д. с. или э. д. с. индукции, а самое явление наведения э. д. с. в провод-

нике — явлением электромагнитной индукции (не следует смешивать с магнитной индукцией!).

Наведение э. д. с. индукции при движении проводника в магнитном поле объясняется следующим образом. При движении проводника вместе с ним движутся и свободные электроны, находящиеся в нем. Из изложенного выше мы знаем, что на электрические заряды, движущиеся в магнитном поле, действует сила в направлении, перпендикулярном направлению магнитного потока. Поэтому при движении электронов вместе с проводником, пересекающим магнитные силовые линии, на электроны будут действовать силы, заставляющие их перемещаться вдоль проводника.



Фиг. 77. Механизм электромагнитной индукции.

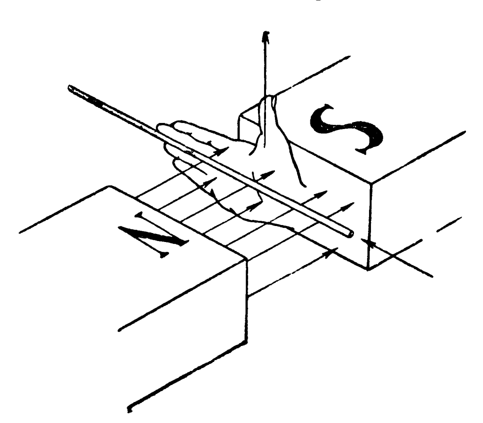
Перемещая проводник, мы перемещаем вместе с проводником все электроны, заключенные в нем, а при перемещении в магнитном поле электрических зарядов на них будет действовать сила по правилу левой руки.

Для определения направления движения электронов воспользуемся известным нам правилом левой руки.

Если, например, проводник, расположенный перпендикулярно чертежу (фиг. 77), перемещается вместе с содержащимися в нем электронами сверху вниз, то это перемещение электронов будет эквивалентно электрическому току, направленному снизу вверх. Если при этом магнитное поле, в котором движется проводник, направлено слева направо, то для определения направления силы, действующей на электроны, мы должны будем поставить левую руку ладонью влево, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а четырьмя пальцами вверх (против направления движения проводника, т. е. по направлению «тока»); тогда направление большого пальца покажет нам, что на электроны, находящиеся в проводнике, будет действовать сила, направленная от нас к чертежу. Следовательно, перемещение электронов будет происходить вдоль проводника, т. е. от нас к чертежу, а индукционный ток в проводнике будет направлен от чертежа к нам.

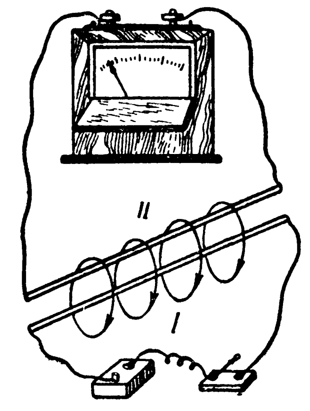
Однако, правило левой руки, примененное нами лишь для объяснения явления электромагнитной индукции, оказывается неудобным на практике. Практически направление индукционного тока определяется по правилу правой руки (фиг. 78).

Правило правой руки состоит в том, что, если поместить правую руку в магнитное поле так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а большой палец указывал направление движения проводника, то остальные



Фиг. 78. Правило правой руки.

Правая рука повернута ладонью навстречу магнитным силовым линиям, большой палец направлен в сторону движения проводника, а четыре пальца показывают, в каком направлении будет течь индукционный ток.



Фиг. 79. Индуктивная связь двух цепей.

При каждом включении и выключении тока в первой цепи во второй цепи возникает индукционный ток.

четыре пальца покажут направление индукционного тока, возникающего в проводнике.

Явление электромагнитной индукции имеет большое значение в электро- и радистехнике; поэтому мы остановимся на нем несколько подробнее.

Пропробуем производить перемещение проводника в магнитном поле с различной скоростью. При этом мы заметим, что стрелка гальванометра будет отклоняться тем больше, чем быстрее наш проводник пересекает магнитное поле. При очень медленном перемещении проводника в нем совершенно не возникает тока или, говоря точнее, ток будет настолько мал, что наш гальванометр не в состоянии его обнаружить.

Далее обратим внимание на то обстоятельство, что, вдвигая проводник в пространство между полюсами магнита, мы тем самым увеличиваем число магнитных силовых линий, охватываемых замкнутым контуром проводника, а при обратном перемещении проводника уменьшаем число этих линий, или,

другими словами, в первом случае магнитный поток, охватываемый нашим замкнутым контуром, увеличивается, а во втором случае уменьшается. С этой точки зрения возникновение индукционного тока в замкнутом проводящем контуре мы можем объяснить как результат изменения величины магнитного потока внутри контура; бо́льшие или меньшие отклонения стрелки при разных скоростях движения проводника свидетельствуют о том, что э. д. с. индукции зависит от скорости изменения магнитного потока внутри контура.

При быстром возрастании (или убывании) магнитного потока внутри контура в нем наводится большая э. д. с. индукции, а при медленном возрастании (или убывании) — малая.

Величину магнитного потока внутри контура можно менять самыми разнообразными способами, и во всех этих случаях в контуре будет возникать индукционный ток. Можно, например, составить две электрические цепи, изображенные на фиг. 79. При каждом включении и выключении тока в первой цепи во второй цепи будет возникать индукционный ток. Объясняется это тем, что при включении тока вокруг первой цепи возникают магнитные силовые линии. Так как вторая цепь находится в непосредственной близости к первой, то часть магнитных силовых линий будет охватывать вторую цепь или, иначе, часть магнитного потока, создаваемого первым контуром, будет пронизывать второй контур. Поэтому во втором контуре будет возникать индукционный ток при каждом появлении и исчезновении магнитного потока.

Две цепи, подобные изображенным на фиг. 79, называются индуктивно связанными.

При монтаже радиоприемников нежелательные («паразитные») индуктивные связи между различными цепями радиоприемника могут доставить очень много неприятностей конструктору. Для предотвращения паразитных индуктивных связей нужно избегать параллельного расположения проводников различных цепей радиоприемника.

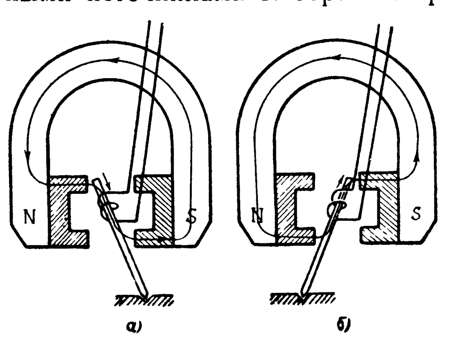
На принципе электромагнитной индукции основано устройство электродинамических микрофонов, звукоснимателей для проигрывания граммофонных пластинок, трансформаторов, электроизмерительных приборов, генераторов электрического тока и т. д.

Рассмотрим в качестве примеров принципы действия динамического микрофона и звукоснимателя.

Устройство динамического микрофона аналогично устройству динамического громкоговорителя. Разница заключается

в том, что в динамическом микрофоне с подвижной катушкой связана легкая мембрана, а не диффузор. Звуковые волны, воздействуя на мембрану, заставляют ее колебаться вместе с катушкой При колебаниях катушки в магнитном поле в ней наводится переменная э. д. с. индукции, которая затем усиливается усилителем.

Звукосниматель состоит из постоянного магнита с полюсными источниками П-образной формы, в поле которого помещен якорь с надетой на него катушкой. В нижней части якоря закрепляется граммофонная игла. Скользя по извилинам звуковой бороздки граммофонной пластинки, игла попеременно отклоняется то вправо, то влево (фиг. 80). Вместе с иглой колеблется и якорь.



Фиг. 80. Принцип действия звукоснимателя.

При колебаниях иглы изменяется направление магнитного потока и в катушке возникает индукционный ток.

При отклонении иглы вправо магнитный поток, выходящий из северного полюса магнита, проходит по якорю сверху вниз (фиг. 80,*а*) и входит в южный полюс. Когда же игла отклоняется влево, то магнитный поток (фиг. 80,*б*) проходит от северного полюса к южному через якорь снизу вверх. Изменения направления магнитного потока наводят в катушке звукоснимателя э. д. с. индукции, которая усиливается затем усилителем и подводится к громкоговорителю.

Приведенные выше примеры показывают нам, что явление электромагнитной индукции используется для превращения механической энергии в электрическую.

Мы намеренно не коснулись здесь устройства генераторов электрического тока и трансформаторов, которые будут описаны в следующих главах.

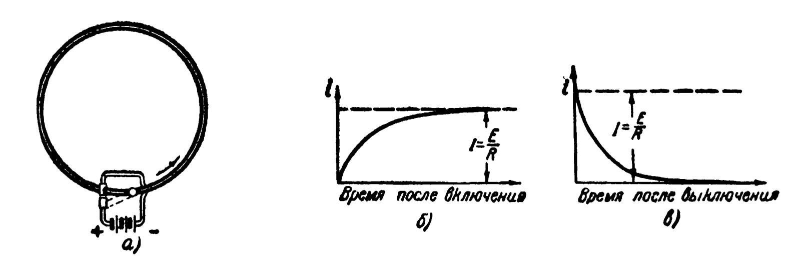
41. САМОИНДУКЦИЯ

Общеизвестно, что поезд, отходящий от станции, не может сразу развить нужную скорость.

Требуемая скорость достигается лишь по истечении некоторого промежутка времени. За этот промежуток значительная

часть энергии паровоза затрачивается на преодоление инерции поезда[1], т. е. на образование запаса кинетической энергии, и очень незначительная часть — на преодоление трения.

В силу того что движущийся поезд обладает запасом кинетической энергии, он не может остановиться мгновенно и будет по инерции двигаться еще некоторое время, т. е. до тех пор, пока не израсходуется на трение весь запас кинетической энергии, сообщенной ему паровозом в начале движения.



Фиг. 81. „Инерция" электрического тока.

После включения источника тока (*а*) ток в цепи устанавливается не сразу (*б*), а после выключения не сразу прекращается (*в*).

Аналогичные явления имеют место и в замкнутой электрической цепи при включении и выключении тока.

В момент включения постоянного тока (фиг. 81,*а*) вокруг проводника образуется магнитное силовое поле. В первые мгновения после включения тока значительная часть энергии источника тока затрачивается на создание этого магнитного поля и лишь незначительная часть — на преодоление сопротивления проводника, вернее на нагревание током проводника. Поэтому в момент замыкания цепи ток не сразу достигает предельной своей величины. Предельная сила тока устанавливается в цепи лишь после окончания процесса образования вокруг проводника магнитного поля (фиг. 81,*б*).

Если, не разрывая замкнутой цепи, выключить из нее источник тока, то ток в цепи прекратится не сразу, а будет протекать в ней, еще некоторое время уменьшаясь постепенно (фиг. 81,*в*) до тех пор, пока не исчезнет магнитное поле вокруг проводника, т. е. пока не израсходуется весь запас энергии, заключенной в магнитном поле.

---

[1] Инерцией называется стремление всякого тела сохранить то состояние (покоя или движения), в котором оно находится.

Итак, магнитное поле является носителем энергии. Оно накопляет в себе энергию при включении источника постоянного тока и отдает ее обратно в цепь после выключения источника тока. Энергия магнитного поля, таким образом, имеет много общего с кинетической энергией движущегося предмета. Магнитное поле служит причиной «инерции» электрического тока.

Мы знаем, что всякий раз, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий площадь, ограниченную замкнутой электрической цепью, в этой цепи появляется э. д. с. индукции.

Кроме того, нам известно, что всякое изменение силы тока в цепи влечет за собой изменение числа магнитных силовых линий, охватываемых этой цепью. Если замкнутая цепь неподвижна, то число магнитных силовых линий, пронизывающих данную площадь, может измениться только тогда, когда новые линии войдут снаружи в пределы этой площади или когда существующие уже линии выйдут за пределы этой площади. И в том и в другом случае магнитные силовые линии при своем движении должны пересечь проводник. Пересекая проводник, магнитные силовые линии наводят в нем э. д. с. индукции. Но так как в этом случае проводник индуктирует э. д. с. в самом себе, то эта э. д. с. называется э. д. с. самоиндукции.

При включении источника постоянного тока в какую-либо замкнутую цепь площадь, ограниченную этой цепью, начинают пронизывать извне магнитные силовые линии. Каждая магнитная силовая линия, приходящая извне, пересекая проводник, наводит в нем э. д. с. самоиндукции.

Электродвижущая сила самоиндукции, действуя против э. д. с. источника тока, задерживает нарастание тока в цепи. Через несколько мгновений, когда возрастание магнитного потока вокруг цепи прекратится, э. д. с. самоиндукции исчезнет и в цепи устанавливается сила тока, определяемая по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}.$$

При выключении источника тока из замкнутой цепи магнитные силовые линии должны исчезнуть из пространства, ограниченного проводником. Каждая уходящая магнитная силовая линия при пересечении проводника наводит в нем э. д. с. самоиндукции, имеющую одинаковое направление с э. д. с. источника тока; поэтому ток в цепи прекратится не сразу, а будет протекать в том же направлении, постепенно уменьшаясь до того момента, пока полностью не исчезнет

магнитный поток внутри цепи. Ток, протекающий по цепи после выключения из нее источника тока, называется экстратоком или током самоиндукции.

Если при выключении источника цепь разрывается, то экстраток проявляется в виде искры в месте размыкания цепи.

Подведем итоги всему сказанному выше:

1. В каждой замкнутой электрической цепи при изменении силы протекающего по ней тока, а также при включении и выключении тока возникает э. д. с., связанная с магнитным полем «собственного» тока, называемая э. д. с. самоиндукции.

2. Электродвижущая сила самоиндукции так же, как и э. д. с. индукции, пропорциональна скорости изменения магнитного потока внутри электрической цепи. Но так как магнитный поток создается электрическим током, протекающим по цепи, то э. д. с. самоиндукции будет пропорциональна также и скорости изменения силы тока в цепи.

3. Электродвижущая сила самоиндукции существует только в течение того времени, пока происходит изменение силы или направления тока в цепи.

4. Электродвижущая сила самоиндукции всегда направлена так, что она препятствует изменению силы тока, протекающего по цепи. Если сила тока уменьшается, то э. д. с. стремится ее удержать на прежнем уровне и, наоборот, если ток возрастает, то она противодействует его возрастанию.

Электродвижущую силу самоиндукции можно сравнить с силой инерции. Внешнее проявление инерции любого тела сказывается тем сильнее, чем быстрее мы изменяем его состояние (покоя или движения). Инерция всегда препятствует изменению состояния тела и зависит от его массы.

Электродвижущая сила самоиндукции также пропорциональна скорости изменения тока и направлена против его изменения.

Величина, характеризующая соотношение между скоростью изменения тока и величиной, проявляющейся при этом в проводнике э. д. с. самоиндукции, называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью проводника.

Индуктивность обозначается буквой *L*.

При свертывании проводника в катушку его индуктивность увеличивается. Чем больше индуктивность проводника, тем больше (при одних и тех же изменениях тока) будет э. д. с. самоиндукции.

Индуктивность измеряется единицей, называемой генри. Сокращенно генри обозначается *гн*.

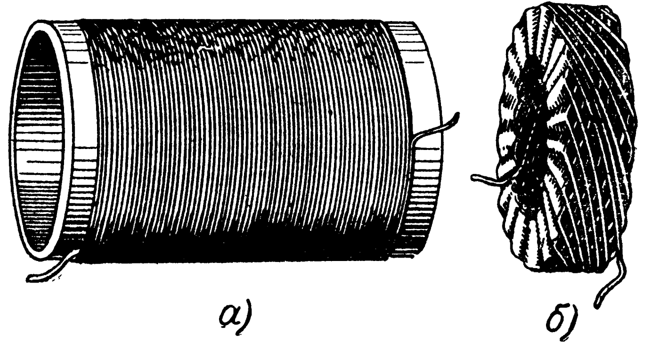
Индуктивностью в 1 *гн* обладает такая катушка, в которой при изменении силы тока на 1 *а* в течение одной секунды наводится э. д. с. самоиндукции, равная 1 *в*.

Кроме генри для измерения индуктивности употребляются тысячная доля генри (миллигенри — *мгн*), миллионная доля генри (микрогенри — *мкгн*) и тысячная доля микрогенри (сантиметр — *см*) (не следует смешивать с единицами емкости и длины):

$$1\ гн = 1\,000\ мгн = 1\,000\,000\ мкгн,$$
$$1\ мгн = 1\,000\ мкгн = 1\,000\,000\ см,$$
$$1\ мкгн = 1\,000\ см.$$

42. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Так как разобранное выше явление особенно сильно проявляется тогда, когда проводник свернут в виде катушки, то последнюю называют поэтому катушкой индуктивности.



Фиг. 82. Конструкции катушек индуктивности.
а — однослойная; *б* — сотовая.

Катушка индуктивности — самая распространенная деталь в радиоустановках (фиг. 82).

Мы остановимся лишь на общих физических свойствах катушек, знание которых должно помочь радиолюбителю осознать смысл расчетных формул.

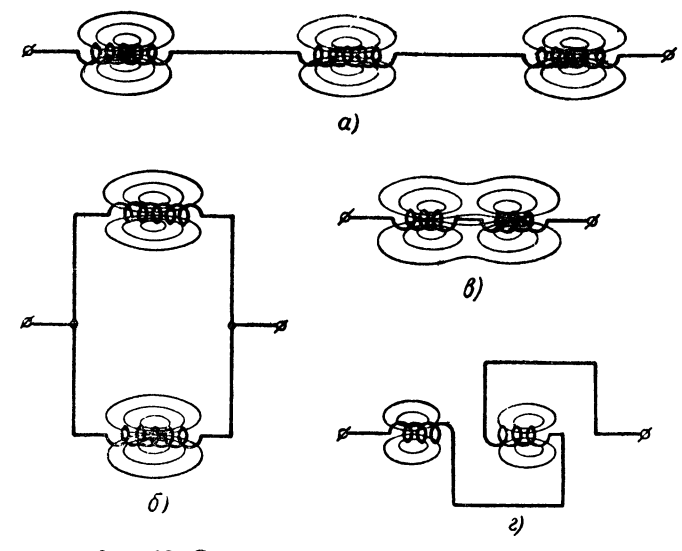
Индуктивность катушки прямо пропорциональна квадрату числа витков, так как с увеличением числа витков возрастает, во-первых, число магнитных силовых линий, и во-вторых, увеличивается число пересечений каждой магнитной силовой линии с проводником. Кроме того, индуктивность катушки растет с увеличением площади витка катушки, так как, чем больше

будет эта площадь, тем больше будет магнитный поток в катушке. Наконец, индуктивность катушки уменьшается при увеличении ее осевой длины, так как, чем длиннее катушка, тем меньшее число витков приходится на единицу ее осевой длины и, следовательно, тем меньше магнитный поток внутри катушки.

Индуктивность катушки, как мы уже знаем, может быть увеличена во много раз введением в нее железного сердечника.

43. СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК

Суммарная индуктивность двух или нескольких катушек, соединенных последовательно и расположенных на таком рас-



Фиг 83. Соединение катушек индуктивности.

а — последовательное соединение; *б* — параллельное соединение; *в* — суммарная индуктивность увеличивается за счет взаимной индуктивности; *г* — суммарная индуктивность уменьшается за счет взаимной индуктивности.

стоянии друг от друга, что магнитное поле одной катушки не пересекает витков другой (фиг. 83,*а*), равна сумме их индуктивностей. Цепь, изображенная на фиг. 83,*а*, обладает общей индуктивностью L, которая выражается так:

$$L = L_1 + L_2 + L_3, \qquad (16)$$

где L_1, L_2, и L_3 — индуктивности отдельных катушек.

Индуктивность цепи, составленной из тех же катушек при параллельном их соединении и при соблюдении того же условия относительно их расположения (отсутствие магнитного взаимодействия), подсчитывается по следующей формуле:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}}. \qquad (17)$$

Индуктивность двух катушек, соединенных параллельно (фиг. 83,*б*), определяется по следующей формуле:

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}. \qquad (17а)$$

Как видим, формулы для подсчета результирующих индуктивностей катушек, соединенных последовательно или параллельно и не взаимодействующих между собой, совершенно тождественны с формулами для подсчета омического сопротивления цепи при последовательном и параллельном соединении.

Если катушки, включенные в цепь последовательно, расположены близко друг к другу, т. е. так, что часть магнитного потока одной катушки пронизывает витки другой, т. е. между катушками существует индуктивная связь (фиг. 83,*в*), то для определения их общей индуктивности приведенная выше формула будет уже непригодна. При таком расположении катушек могут быть два случая, а именно:

1) магнитные потоки обеих катушек имеют одинаковые направления;

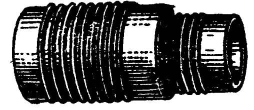
2) магнитные потоки обеих катушек направлены навстречу друг другу.

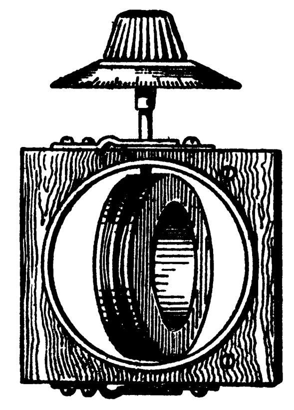
Тот или другой случай будет иметь место в зависимости от направления витков обмотки катушек и от направлений токов в них. Если обе катушки намотаны в одну сторону и токи в них текут в одном направлении, то это будет соответствовать первому случаю; если же токи текут в противоположных направлениях (фиг. 83,*г*), то будет иметь место второй случай.

Разберем первый случай, когда магнитные потоки направлены в одну сторону. Очевидно, при этих условиях витки каждой катушки будут пронизываться своим потоком и частью потока другой катушки, т. е. магнитные потоки в той и в другой катушке будут больше по сравнению с тем случаем, когда между катушками нет индуктивной связи. Увеличение магнит-

ного потока, пронизывающего витки той или иной катушки, равносильно увеличению ее индуктивности. Поэтому общая индуктивность цепи в рассматриваемом случае будет больше суммы индуктивностей отдельных катушек, из которых составлена цепь.

Рассуждая таким же образом, мы придем к выводу, что для второго случая, когда потоки направлены навстречу друг





а) б)

Фиг. 84. Принцип действия вариометра,

а — одна катушка вдвигается в другую; *б* — подвижная катушка поворачивается внутри неподвижной.

другу, общая индуктивность цепи будет меньше суммы индуктивностей отдельных катушек.

Подсчет величины индуктивности цепи, составленной из двух соединенных последовательно индуктивностей L_1 и L_2 при наличии между ними индуктивной связи, производится по формуле

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M. \quad (18)$$

В первом случае ставится знак + (плюс), а во втором случае знак — (минус).

Величина M, называемая **коэффициентом взаимной индукции**, представляет собой добавочную индуктивность, обусловленную частью магнитного потока, общей для обеих катушек.

На явлении взаимоиндукции основано устройство вариометров. Вариометр состоит из двух катушек, общая индуктивность которых может, по желанию, плавно изменяться в неко-

торых пределах. В радиотехнике вариометры применяются для настройки колебательных контуров приемников и передатчиков.

Простейший вариометр можно устроить из двух цилиндрических катушек разных диаметров, соединенных последовательно и вдвигающихся одна в другую (фиг. 84,*а*) При этом изменяется величина взаимной индуктивности, а следовательно, изменяется и общая индуктивность вариометра.

На практике обычно применяют другой, более удобный способ изменения взаимной индуктивности между катушками. Способ этот состоит в том, что одна катушка укрепляется неподвижно, а другая может вращаться на оси, установленной перпендикулярно воображаемым осям обеих катушек (фиг. 84,*б*). Изменяя угол поворота второй катушки относительно первой от 0° до 180°, можно изменять индуктивность вариометра от

$$L_{макс} = L_1 + L_2 + 2M \text{ до } L_{мин} = L_1 + L_2 - 2M,$$

т. е. в пределах $4M$.

Для уяснения изложенного решим числовой пример.

Пример 21. Определить, чему равна общая индуктивность цепи, состоящей из двух последовательно соединенных катушек, первая из которых обладает индуктивностью $L_1 = 1\,000$ *мкгн* и вторая $L_2 = 500$ *мкгн*. Величина взаимной индуктивности между этими катушками равна: $M = 100$ *мкгн*.

Решение. В зависимости от взаимного расположения катушек общая их индуктивность будет иметь два значения, т. е.

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M.$$

1. Если магнитные потоки обеих катушек направлены одинаково, то

$$L = L_1 + L_2 + 2M = 1\,000 + 500 + 2 \cdot 100 = 1\,700 \text{ мкгн}.$$

2. Если же магнитные потоки катушек направлены навстречу друг другу, то

$$L = L_1 + L_2 - 2M = 1\,000 + 500 - 2 \cdot 100 = 1\,300 \text{ мкгн}.$$

В радиотехнике часто бывают нужны сопротивления, не обладающие индуктивностью. Для изготовления таких сопротивлений применяется так называемая бифилярная намотка.

Способ бифилярной намотки состоит в том, что кусок изолированного провода требуемой длины складывается вдвое и намотка затем производится таким сдвоенным проводником.

При таком способе намотки катушки она будет состоять из двух равных половин, в которых токи всегда будут направ-

лены навстречу друг другу. Магнитное поле, создаваемое одной половиной такой обмотки, будет уничтожаться магнитным полем другой половины, и поэтому результирующее магнитное поле катушки будет равно нулю.

44. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Энергия движущегося предмета, называемая кинетической энергией, зависит от массы предмета и скорости его движения. Если обозначить массу движущегося предмета буквой m, а скорость его движения буквой v, то энергию движения A можно определить по формуле

$$A = \frac{mv^2}{2}.$$

Эта формула говорит нам о том, что кинетическая энергия прямо пропорциональна массе движущегося предмета и квадрату скорости его движения.

Все это не имеет, конечно, прямого отношения к электротехнике. Однако, мы уже несколько раз пользовались механическими аналогиями при рассмотрении электромагнитных явлений, сравнивая энергию магнитного поля с кинетической энергией, явление самоиндукции — с инерцией и, наконец, индуктивность с механической массой. Продолжим это сравнение и дальше.

Оказывается, энергия магнитного поля равна половине произведения индуктивности цепи на квадрат силы тока, т. е.

$$A = \frac{LI^2}{2}. \qquad (19)$$

Сравнивая эту формулу с формулой для кинетической энергии, нетрудно убедиться в том, что они очень похожи одна на другую.

Из сопоставления этих формул следует также, что силе тока I в механике соответствует скорость движения v.

45. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные свойства магнитных силовых линий?
2. Что такое магнитный поток?
3. При помощи какого правила определяют направление магнитных силовых линий, созданных электрическим током?
4. От чего зависит напряженность магнитного поля соленоида?
5. Почему магнитный поток катушки увеличивается при помещении в нее железного сердечника?

6. Что такое магнитная проницаемость?

7. Почему проводник с током выталкивается из пространства между полюсами магнита?

8. Для чего служит «правило левой руки»?

9. От чего зависит сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле?

10. В чем состоит явление электромагнитной индукции?

11. Для чего служит «правило правой руки»?

12. От чего зависит э. д. с. индукции?

13. В чем состоит явление самоиндукции?

14. Что такое экстраток?

15. Что такое индуктивность?

16. Почему индуктивность проводника увеличивается при свертывании его в катушку?

17. Какими единицами измеряется индуктивность?

18. От каких величин зависит индуктивность катушки?

19. Что такое взаимоиндукция?

20. От каких величин и как зависит энергия магнитного поля?

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

46. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

До сих пор мы рассматривали электрический ток, направление и сила которого оставались постоянными, т. е. не изменялись с течением времени. Такой ток мы называли постоянным. При постоянном токе электроны движутся по проводнику все время в одном и том же направлении (если не считать хаотического теплового движения электронов), причем количество движущихся электронов и скорость их движения все время остаются постоянными.

Условное графическое изображение постоянного тока приведено на фиг. 85.

Переменный ток отличается от постоянного тем, что он периодически изменяет свое направление, т. е. течет по проводнику то в одну, то в другую сторону.

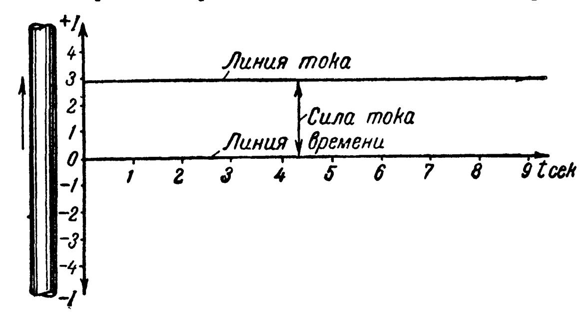
Переменный ток можно получить при помощи очень простой схемы, изображенной на фиг. 86,*а*. При каждом передвижении переключателя изменяется лишь направление тока в цепи, сила же тока при этом остается все время неизменной.

Графическое изображение переменного тока, полученного таким способом, приведено на фиг. 86,*б*, где ток, протекающий по проводнику в одном направлении, отложен над горизон-

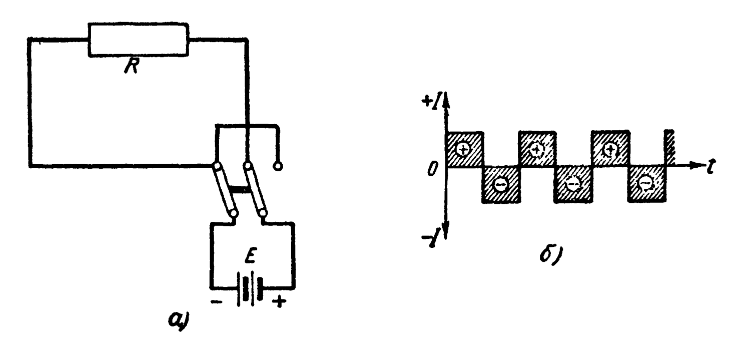
тальной линией $0t$, а ток обратного направления — под горизонтальной линией $0t$.

Рассмотрим другой, белее распространенный случай переменного тока, когда изменяется не только направление тока, но и его сила.

Представим себе проводник, согнутый в виде рамки и вращающийся в равномерном магнитном поле (фиг. 87). При



Фиг. 85. График постоянного тока.

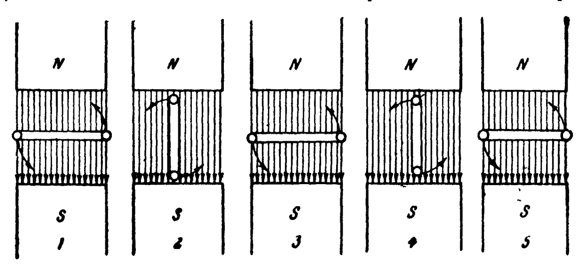


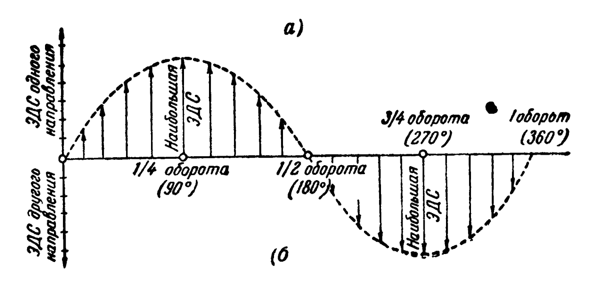
Фиг. 86. Простейший способ получения переменного тока (*а*) и его график (*б*).

вращении рамки магнитный поток, охватываемый ею, будет изменяться; следовательно, в рамке возникнет э. д. с. индукции. Пусть рамка вращается с равномерной скоростью. Мы уже знаем, что величина э. д. с., индуктированной в рамке, будет тем больше, чем быстрее будет изменяться число магнитных силовых линий, охватываемых рамкой, или иначе, чем большее число магнитных силовых линий будут пересекать стороны рамки в единицу времени (например в одну секунду).

Примем за начальное то положение рамки, когда она охватывает наибольшее число магнитных силовых линий, т. е. когда плоскость ее перпендикулярна направлению магнитного потока. На фиг. 87 это положение отмечено цифрой *1*.

В начале вращения рамки ее стороны будут скользить почти вдоль магнитных силовых линий, пересекая очень малое число их, т. е. магнитный поток, проходящий через рамку,





Фиг. 87. Получение синусоидального переменного тока.

а — ряд последовательных положений рамки в магнитном поле; *б* — график тока (синусоида).

будет изменяться очень медленно; следовательно, и наводимая этим изменением потока э. д. с. индукции будет невелика.

По мере приближения рамки к положению *2*, когда плоскость ее становится параллельной силовым линиям, количество пересекаемых рамкой силовых линий возрастает (при постоянной скорости вращения рамки), а следовательно, возрастает и индуктируемая в ней э. д. с.

Когда рамка пройдет положение *2*, действующая в рамке э. д. с. начнет постепенно убывать и станет равной нулю, когда рамка сделает полоборота (положение *3*). Затем э. д. с. будет снова возрастать, но уже в обратном направлении, так как те-

перь стороны рамки будут пересекать магнитные силовые линии в противоположном направлении. В момент, когда рамка займет положение *4*, т. е. сделает три четверти оборота, э. д. с. будет наибольшей, после чего она начнет снова убывать и сделается равной нулю в тот момент, когда рамка завершит полный оборот (положение *5*).

При дальнейшем вращении рамки все явления будут повторяться в прежнем порядке. Так как э. д. с. в рамке непрерывно изменяется по величине и, кроме того, два раза в течение каждого оборота изменяет свое направление, то и ток, вызываемый ею в рамке, будет также изменяться и по величине и по направлению.

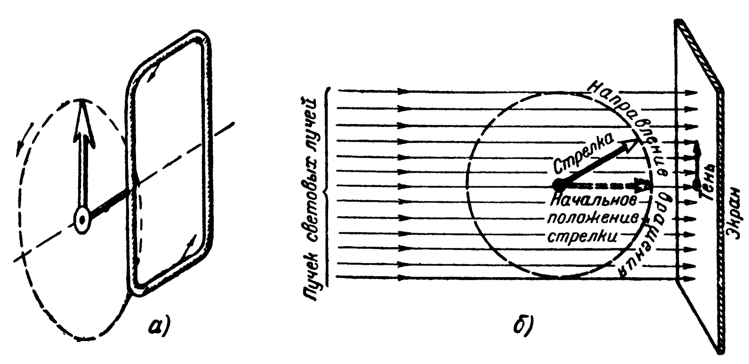
Условимся изображать изменение переменной э. д. с., наводимой в рамке при вращении ее в магнитном поле, таким образом, что по горизонтальной прямой линии (оси) слева направо будем откладывать в каком-нибудь масштабе угол поворота рамки или время, протекшее от начала поворота, а вверх и вниз (по вертикали) будем откладывать те э. д. с., которые наводятся в рамке при данном угле ее поворота. Вверх будем откладывать э. д. с. одного направления, а вниз— э. д. с. другого направления. В результате такого построения получим график изменения э. д. с. в зависимости от угла поворота рамки или, что то же самое, в зависимости от времени, так как рамка вращается с постоянной скоростью. Кривая эта, изображенная на фиг. 87,*б*, очень часто встречается в электротехнике и носит название с и н у с о и д ы.

Итак, мы видим, что при равномерном вращении рамки в равномерном магнитном поле в ней индуктируется переменная э. д. с., изменяющаяся по периодическому закону, выражаемому синусоидой; э. д. с. и токи, изменяющиеся по такому закону, называются синусоидальными.

Свяжем мысленно с вращающейся рамкой стрелку, укрепленную на одной оси с рамкой (фиг. 88,*а*). Направим на вращающуюся стрелку пучок параллельных световых лучей так, как это изображено на фиг. 88,*б*, а с другой стороны стрелки поставим экран (например лист бумаги). Электродвижущая сила, индуктируемая в рамке, в каждый данный момент будет пропорциональна длине тени, отбрасываемой стрелкой на экран. Длина тени в начальный момент, когда стрелка находится в горизонтальном положении, т. е. острием направлена в сторону экрана, будет равна нулю.

При вращении стрелки в направлении, указанном на фиг. 88, ее тень начнет удлиняться, вытягиваясь вверх. Снача-

ла удлинение тени будет происходить быстро, но по мере приближения стрелки к вертикальному положению оно замедлится и, наконец, совсем прекратится, когда длина тени сделается равной длине стрелки. После этого тень будет укорачиваться, сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее и, наконец, сделается равной нулю в тот момент, когда стрелка, совершив полоборота, займет горизонтальное положение. В то время, когда стрелка будет совершать следующую половину оборота,



Фиг. 88. Модель синусоидального колебания.

а — вместе с рамкой вращается стрелка; *б* — кончик тени от стрелки совершает синусоидальные колебания.

ее тень совершит такое же удлинение и укорочение, как и прежде, с той лишь разницей, что удлиняться она теперь будет не вверх, а вниз.

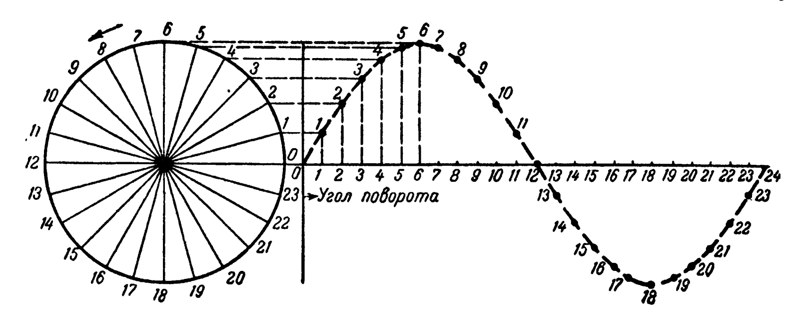
При каждом обороте стрелки ее тень будет совершать одно полное колебание.

Колебания тени вращающейся стрелки дают полную картину изменения скорости движения электронов в проводнике при синусоидальном переменном токе. Скорость свободных электронов в проводнике сначала невелика; затем электроны начинают двигаться все быстрее и быстрее (сила тока увеличивается). В некоторый момент скорость электронов достигает своей максимальной величины (сила тока максимальна), после чего электроны постепенно замедляют свое движение и, наконец, совсем останавливаются (сила тока равна нулю).

Однако, практически электроны не делают остановки, так как они тотчас же начинают движение в обратном направлении (ток изменяет свое направление) с постепенно увеличивающейся скоростью (сила тока растет) и т. д.

Начертим окружность, внутри которой наметим несколько положений радиуса, занимаемых им при равномерном движении его конца по окружности. На фиг. 89 показано 24 последовательных положения радиуса, занимаемых им через каждые 15° поворота. Справа от этой окружности проведем горизонтальную линию на высоте центра окружности. Разделим горизонтальную линию также на 24 части, каждая из которых будет соответствовать 15° окружности.

Из каждой отмеченной точки на горизонтальной оси проведем вертикальную линию, равную проекции радиуса на вер-



Фиг. 89. Построение синусоиды.

Окружность и горизонтальная линия разделены на одинаковое число частей.

тикальный диаметр или длине тени при данном угле поворота. Соединим плавной кривой концы всех вертикальных линий. Эта кривая и будет синусоидой.

Вращающийся радиус, употребляемый при построении синусоиды, называется радиусом-вектором.

47. ПЕРИОД, ЧАСТОТА, АМПЛИТУДА, ФАЗА

Время, в течение которого совершается одно полное изменение э. д с., т. е. один цикл колебания или один полный оборот радиуса-вектора, называется периодом колебания переменного тока. Период выражают в секундах и обозначают буквой T.

Число полных изменений э. д. с. или число оборотов радиуса-вектора, т. е. иначе говоря, число полных циклов колебаний, совершаемых переменным током в течение одной секунды, называется частотой колебаний переменного тока. Частота обозначается буквой f и выражается в периодах в секунду или в герцах.

Одна тысяча герц называется килогерцом (*кгц*), а миллион герц — мегагерцом (*мггц*).

Чем быстрее происходит изменение э. д. с., т. е. чем быстрее вращается радиус-вектор, тем меньше период колебания Чем быстрее вращается радиус-вектор, тем выше частота. Таким образом, частота и период являются величинами, обратно пропорциональными друг другу. Чем больше одна из них, тем меньше другая.

Математическая связь между периодом и частотой выражается формулами

$$f = \frac{1}{T} \text{ и } T = \frac{1}{f}. \qquad (20)$$

Например, если частота равна 50 *гц*, то период будет равен:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ сек.}$$

И наоборот, если известно, что период равен 0,02 сек, ($T = 0{,}02$ сек.), то частота будет равна:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}02} = \frac{100}{2} = 50 \text{ гц.}$$

Частота переменного тока, используемого для освещения и промышленных целей, как раз и равна 50 *гц*.

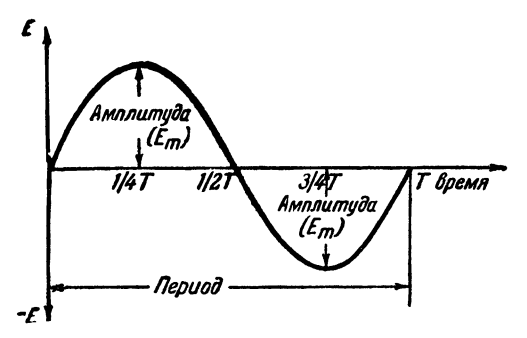
Частоты от 16 до 20 000 *гц* называются звуковыми частотами. Токи в антеннах радиостанций колеблются с частотами до 1 500 000 000 *гц* или, иначе говоря, до 1 500 *мггц*. Такие высокие частоты называются радиочастотами или колебаниями высокой частоты. Наконец, токи в антеннах радиолокационных станций колеблются с частотами до 40 000 *мггц*.

Наибольшее значение, которого достигает э д. с. или сила тока за один период, называется амплитудой э. д. с. или силы тока. Легко заметить, что амплитуда в масштабе равна длине радиуса-вектора. Амплитуды тока и э. д. с. обозначаются буквами $I_м$ и $E_м$ (фиг. 90).

Скорость вращения радиуса-вектора, т. е. изменение величины угла поворота в течение одной секунды, называется круговой частотой и обозначается греческой буквой ω (омега). Угол поворота радиуса-вектора в любой данный момент относительно его начального положения измеряется обычно не в градусах, а в особых единицах — р а д и а н а х. Радианом

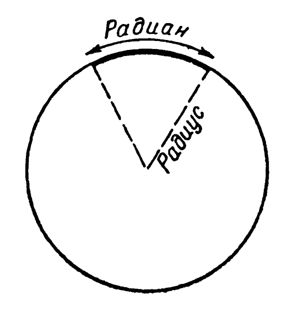
называется длина дуги окружности, равная радиусу (фиг. 91). Вся окружность, составляющая 360°, равна 6,28 радиан.

Следовательно, конец радиуса-вектора в течение одного периода пробегают путь, равный 6,28 радиан. Так как в течение одной секунды радиус-вектор совершает число оборотов, равное частоте переменного тока f, то за одну секунду его конец пробегает путь, равный $6{,}28 \cdot f$ радиан. Это выражение, ха-



Фиг. 90. Период и амплитуда синусоидального колебания.

Период — время одного колебания, амплитуда — его наибольшее мгновенное значение (размах).



Фиг. 91. Радиан.

Длина дуги окружности, равная радиусу.

рактеризующее скорость вращения радиуса-вектора, и будет круговой частотой — ω.

Итак, $\omega = 6{,}28 \cdot f$.

Угол поворота радиуса-вектора в любое данное мгновение относительно его начального положения называется фазой. Фаза характеризует величину э. д. с. (или тока) в данное мгновение или, как говорят, мгновенное значение э. д. с., ее направление в цепи и направление ее изменения; фаза показывает, убывает ли э. д. с. или возрастает.

Полный оборот радиуса-вектора равен 360°. С началом нового оборота радиуса-вектора изменение э. д. с. происходит в том же порядке, что и в течение первого оборота. Следовательно, все фазы э. д. с. будут повторяться в прежнем порядке. Например, фаза э. д. с. при повороте радиуса-вектора на угол в 370° будет такой же, как и при повороте на 10°. В обоих этих случаях радиус-вектор занимает одинаковое положение, и, следовательно, мгновенные значения э. д. с. будут в обоих этих случаях одинаковыми по фазе.

Пример 22. Ток в антенне радиостанции совершает 164 000 колебаний в секунду. Определить частоту и период этого тока.

Решение:

1) $f = 164\,000$ *гц*,

2) $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{164\,000} = 0{,}0000061$ сек.

Пример 23. Одно полное колебание тока в электрической лампе накаливания происходит в течение 0,02 сек. Определить частоту тока.

Решение:

1) $T = 0{,}02$ сек.

2) $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}02} = 50$ *гц*.

48. ЭФФЕКТИВНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Переменный ток, протекая по проводнику, нагревает его так же, как и постоянный ток. Силу переменного тока удобно оценивать по его тепловому действию (эффекту) или, как говорят, по действующей, эффективной его величине.

Действующая или эффективная сила переменного тока равна силе такого постоянного тока, который, протекая по данному проводнику, выделяет в нем ежесекундно то же количество энергии в виде тепла, что и переменный ток. Тепловой эффект тока, а значит, и эффективные значения переменного тока зависят не только от наибольших значений, которых достигает переменный ток, но и от формы тока.

Вообще говоря, в электротехнике, и особенно в радиотехнике, приходится иметь дело с токами довольно сложной формы. Но все эти токи могут быть представлены в виде суммы нескольких синусоидальных токов с различными частотами, амплитудами и начальными фазами. Поэтому очень важную роль играет связь между амплитудным и эффективным значениями для синусоидального тока.

Если известна амплитуда переменного синусоидального тока, то действующее или эффективное его значение определяется по формуле

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot I_м, \qquad (21)$$

т. е. эффективное значение синусоидального тока в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитудного значения.

Аналогичная формула применяется и для вычисления эффективного значения синусоидального напряжения:

$$U = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707U_м. \qquad (21а)$$

Протекая по проводнику, переменный ток создает в нем эффективное падение напряжения, равное произведению эффективного значения силы тока на сопротивление проводника, т. е.

$$U = IR.$$

Пример 24. Определить эффективное значение переменного тока, амплитуда которого равна 9,9 *а*.

Решение:

1) $I_м = 9{,}9$ *а*, $I = ?$

2) $I = 0{,}707\ I_м = 0{,}707 \cdot 9{,}9 = 7$ *а*.

Пример 25. Эффективное напряжение городской осветительной сети равно 127 *в*. Какова амплитуда напряжения в сети?

Решение:

1) $U = 127$ *в*, $U_м = ?$.

2) $U_м = 127 \cdot \sqrt{2} = 127 \cdot 1{,}41 = 179$ *в*.

49. СДВИГ ФАЗ

Мощность постоянного тока, как мы уже знаем, равна произведению напряжения на силу тока. Но при постоянном токе направления тока и напряжения всегда совпадают. При переменном же токе совпадение направлений тока и напряжения имеет место только в случае отсутствия в цепи тока конденсаторов и соленоидов.

Для этого случая формула мощности

$$P = UI \left(\text{или } P = \frac{U_м}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_м}{\sqrt{2}} = \frac{U_м \cdot I_м}{2} \right)$$

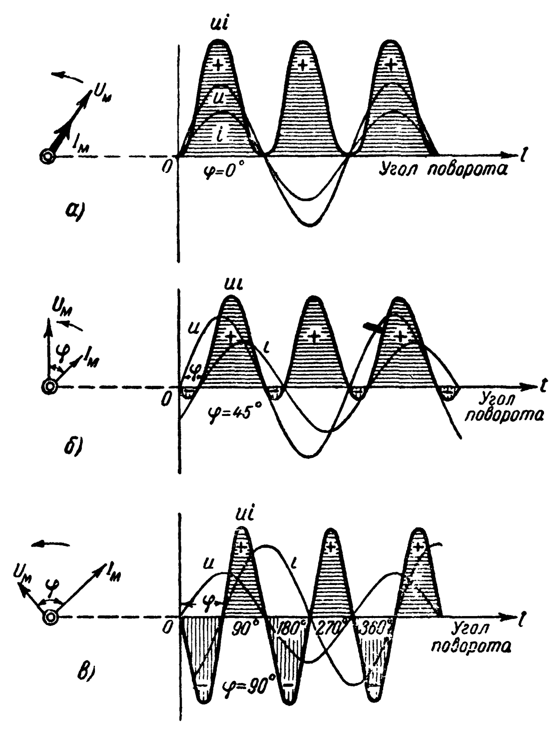
остается справедливой.

На фиг. 92,*а* представлена кривая изменения мгновенных значений мощности для этого случая. Обратим внимание на то обстоятельство, что направления векторов напряжения и тока в этом случае совпадают, т. е. фазы тока и напряжения всегда одинаковы.

При наличии в цепи переменного тока конденсатора или катушки индуктивности, фазы тока и напряжения совпадать

не будут. О причинах этого несовпадения мы будем говорить в следующей главе, а сейчас установим, как будет оно влиять на величину мощности переменного тока.

Представим себе, что при начале вращения радиусы-векторы тока и напряжения имеют различные направления. Так



Фиг. 92. Сдвиг фаз тока и напряжения.

а — сдвига фаз нет, мощность все время положительна; *б* — фазы тока и напряжения сдвинуты на 45°, мощность в некоторые периоды времени становится отрицательной; *в* — фазы тока и напряжения сдвинуты на 90°, мощность в течение одной четверти периода положительна, а в течение другой отрицательна. В среднем мощность равна нулю.

как оба вектора вращаются с одинаковой скоростью, то угол между ними будет оставаться неизменным во все время их вращения. На фиг. 92,*б* изображен случай отставания вектора тока $I_м$ от вектора напряжения $U_м$ на угол в 45°. Рассмотрим, как будут изменяться при этом ток и напряжение. Из построенных синусоид тока и напряжения видно, что когда на-

пряжение u проходит через нуль, ток i имеет отрицательное значение. Затем напряжение достигает своей наибольшей величины и начинает уже убывать, а ток хотя и становится положительным, но еще не достигает наибольшей величины и продолжает возрастать. Напряжение изменило свое направление, а ток все еще течет в прежнем направлении и т. д. Фаза тока все время запаздывает по сравнению с фазой напряжения. Между фазами напряжения и тока существует постоянный сдвиг, называемый сдвигом фаз.

Действительно, если мы посмотрим на фиг. 92,*б*, то заметим, что синусоида тока сдвинута вправо относительно синусоиды напряжения. Так как по горизонтальной оси мы откладываем градусы поворота, то и сдвиг фаз можно измерять в градусах. Нетрудно заметить, что сдвиг фаз в точности равен углу между радиусами-векторами тока и напряжения.

Вследствие отставания фазы тока от фазы напряжения его направление в некоторые моменты не будет совпадать с направлением напряжения. В эти моменты мощность тока будет отрицательной, так как произведение положительной величины на отрицательную величину всегда будет отрицательным. Это значит, что внешняя электрическая цепь в эти моменты становится не потребителем электрической энергии, а источником ее. Некоторое количество энергии, поступившей в цепь во время части периода, когда мощность была положительной, возвращается источнику энергии в ту часть периода, когда мощность отрицательна.

Чем больше сдвиг фаз, тем продолжительнее становятся части периода, в течение которых мощность делается отрицательной; тем, следовательно, меньше будет средняя мощность тока.

При сдвиге фаз в 90° мощность в течение одной четверти периода будет положительной, а в течение другой четверти периода — отрицательной. Следовательно, средняя мощность тока будет равна нулю, и ток не будет производить никакой работы (фиг. 92,*в*).

Теперь ясно, что мощность переменного тока при наличии сдвига фаз будет меньше произведения эффективных значений тока и напряжения, т. е. формулы

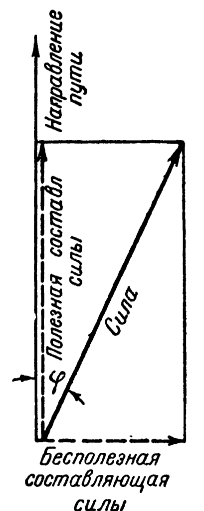
$$P = UI \text{ и } P = \frac{U_м \cdot I_м}{2}$$

в этом случае будут неверны

50. МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как же вычислить мощность переменного тока в том случае, когда направления радиусов-векторов тока и напряжения не совпадают?.

Представим себе, что мы тянем вагонетку с грузом, катящуюся по рельсам. Но наши усилия направлены не как обычно, вдоль рельсов, а под некоторым углом к ним. Угол между направлением движения вагонетки и направлением наших усилий обозначим буквой φ (фи).



Фиг. 93. Разложение силы на полезную и бесполезную составляющие.

Полезная составляющая направлена вдоль пути, а бесполезная — под прямым углом к нему.

Ясно, что при таком способе передвижения вагонетки часть наших сил будет затрачиваться бесполезно, не производя работы, т. е. работа не будет равна произведению приложенной силы на пройденный путь, как обычно (работа = сила×путь), а будет меньше этого произведения.

Для того чтобы вычислить количество произведенной работы, нужно силу, приложенную к вагонетке, разложить на две части или на две составляющих. Это разложение силы сделано на фиг. 93. Составляющая силы, направленная вдоль движения, которая называется проекцией силы на направление движения, будет полезной силой, а, составляющая, направленная под прямым углом к направлению движения, будет силой бесполезной.

Если стрелка (вектор), изображающая силу, вычерчена в масштабе, то, измерив полезную составляющую силы, мы можем определить количество работы: работа = полезная сила×путь.

Теперь обратимся к радиусам-векторам тока и напряжения. Здесь полностью применим тот же самый метод. Мощность переменного тока будет равна половине произведения вектора напряжения и проекции вектора тока на вектор напряжения. Как нетрудно видеть, величина проекции зависит, во-первых, от длины проектируемого вектора, а во-вторых. от угла между ним и направлением, на которое он проектируется. Если обозначить этот угол буквой φ, то длина проекции будет равна длине проектируемого вектора, умноженной на особый коэффициент, характеризующий этот угол, называемый косинусом

угла (cos φ). Значения косинусов различных углов приведены в табл. 4.

Таблица 4

φ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
cos φ	1	0,985	0,940	0,866	0,766	0,643	0,500	0,342	0,174	0,000

Итак, проекция радиуса-вектора равна длине радиуса-вектора, умноженной на cos φ.

И, следовательно, мощность переменного тока равна:

$$P = \frac{U_м \cdot I_м}{2} \cdot \cos\varphi. \qquad (22)$$

или

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi. \qquad (22а)$$

Пример 26. Вычислите мощность

$U = 120$ *в*; $I = 2$ *а*; угол сдвига фаз $\varphi = 60°$.

Решение. По табл, 4 находим для угла в 60° $\cos\varphi = 0{,}5$. Следовательно, мощность будет равна:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 120 \cdot 2 \cdot 0{,}5 = 120 \text{ вт}.$$

51. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?
2. Какой ток называется синусоидальным?
3. Что называется периодом?
4. Что такое частота тока?
5. Какими единицами измеряется частота?
6. Что называется круговой частотой?
7. Что такое фаза тока?
8. Как определить эффективное значение переменного тока?
9. Почему при сдвиге фаз уменьшается мощность переменного тока?
10. Как определить мощность переменного тока при наличии сдвига фаз?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

62. ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Так как самоиндукция препятствует всякому резкому изменению силы тока в цепи, то, следовательно, она представляет собой для переменного тока особого рода сопротивление, называемое индуктивным сопротивлением.

Чисто индуктивное[1] сопротивление отличается от обычного (омического) сопротивления тем, что при прохождении через него переменного тока в нем не происходит потери мощности. При этом наблюдается явление, о котором мы уже говорили: в течение одной четверти периода, когда ток возрастает, магнитное поле потребляет энергию из цепи, а в течение следующей четверти периода, когда ток убывает, возвращает ее в цепь. Следовательно, в среднем за период в индуктивном сопротивлении мощность не затрачивается. Поэтому индуктивное сопротивление называется **реактивным** (прежде его неправильно называли безваттным).

Индуктивное сопротивление одной и той же катушки будет различным для токов различных частот. Чем выше частота переменного тока, тем большую роль играет индуктивность и тем больше будет индуктивное сопротивление данной катушки. Наоборот, чем ниже частота тока, тем индуктивное сопротивление катушки меньше. При частоте, равной нулю (установившийся постоянный ток), индуктивное сопротивление тоже равно нулю.

Индуктивное сопротивление обозначается буквой X_L и измеряется в омах.

Подсчет индуктивного сопротивления катушки для переменного тока данной частоты производится по формуле

$$X_L = 6{,}28 \cdot f \cdot L, \tag{23}$$

где X_L — индуктивное сопротивление в *ом*;
f — частота переменного тока в *гц*;
L — индуктивность катушки в *гн*.

Как известно, величину $6{,}28 \cdot f$ называют круговой частотой и обозначают буквой ω (омега). Поэтому приведенная выше формула может быть представлена так:

$$X_L = \omega L. \tag{23а}$$

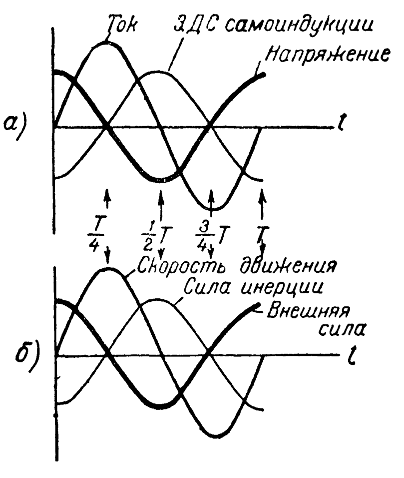
Отсюда следует, что для постоянного тока ($\omega = 0$) индуктивное сопротивление равно нулю. Поэтому, когда нужно про-

[1] Под „чисто индуктивным сопротивлением" мы понимаем сопротивление, оказываемое переменному току катушкой, проводник которой не обладает вовсе омическим сопротивлением. В действительности же всякая катушка обладает некоторым омическим сопротивлением. Но если это сопротивление невелико по сравнению с индуктивным сопротивлением, то им можно пренебречь.

пустить по какой-либо цепи постоянный ток, задержав в то же время переменный, то в цепь включают последовательно катушку индуктивности.

Для преграждения пути токам низких звуковых частот ставят катушки с железным сердечником, так называемые дроссели низкой частоты, а для более высоких радиочастот — без железного сердечника, которые носят название дросселей высокой частоты.

В цепи, содержащей индуктивное сопротивление, фаза тока всегда отстает от фазы напряжения. Разберем причины этого отставания на простейшем примере, когда в цепи имеется только индуктивное сопротивление, а омического сопротивления нет вовсе, или вернее омическим сопротивлением провода катушки самоиндукции можно пренебречь, так как оно мало.



Фиг. 94. Самоиндукция — инерция.

а — соотношение фаз тока, напряжения и э. д. с. самоиндукции; *б* — соотношение фаз скорости движения, внешней силы и силы инерции.

Для удобства рассмотрения явлений будем считать, что мы присоединяем катушку индуктивности к источнику переменного тока в тот момент, когда напряжение U на его зажимах имеет амплитудное значение (фиг. 94,*а*). Этот момент будем считать началом периода.

В момент включения катушки в ней немедленно возникнет электрический ток. Но ток не может сразу достичь своего амплитудного значения потому, что при его возникновении вокруг катушки начнет появляться магнитное поле, которое будет наводить в катушке э. д. с. самоиндукции, направленную против внешнего напряжения, т. е. напряжения источника переменного тока. Электродвижущая сила самоиндукции будет препятствовать быстрому нарастанию силы тока в катушке. Поэтому нарастание тока будет длиться целую четверть периода.

По мере приближения к концу первой четверти периода скорость нарастания тока в катушке постепенно уменьшается.

Но вместе с тем ослабевает и э. д. с. самоиндукции, так как величина ее зависит от скорости изменения силы тока.

Итак, в конце первой четверти периода внешнее напряжение, приложенное к катушке, будет равно нулю, э. д. с. самоиндукции также будет равна нулю, а ток в катушке и магнитный поток вокруг нее будут иметь амплитудные значения. В магнитном поле катушки будет запасено некоторое количество энергии, полученной от источника тока.

С началом второй четверти периода внешнее напряжение, переменив свое направление, будет возрастать, вследствие чего ток в катушке, текущий все еще в прежнем направлении, начнет уменьшаться Но теперь в катушке снова возникнет э. д. с. самоиндукции, обусловленная уменьшением магнитного потока, которая будет поддерживать ток в прежнем направлении.

В течение всей второй четверти периода внешнее напряжение будет увеличиваться, а сила тока — уменьшаться. Скорость уменьшения силы тока, оставаясь небольшой в начале второй четверти, станет постепенно нарастать и в конце этой четверти достигнет наибольшей величины.

Итак, к концу второй четверти периода внешнее напряжение приближается к амплитудному значению, а сила тока и магнитный поток приближаются к нулю, убывая все с большей скоростью, вследствие чего э. д. с. самоиндукции достигает своего амплитудного значения. Направление э. д. с. самоиндукции, как всегда, остается противоположным направлению внешнего напряжения. Энергия, запасенная в магнитном поле за первую четверть периода, теперь возвращается обратно в цепь.

В течение второй половины (третья и четвертая четверти) периода все явления будут происходить в том же порядке, с той лишь разницей, что направления тока, внешнего напряжения и э. д. с. самоиндукции изменяются на противоположные (фиг. 94,*а*).

Таким образом, фаза тока все время отстает от фазы напряжения, причем нетрудно заметить, что сдвиг фаз тока и напряжения равен 90°.

Представим себе, что мы толкаем вдоль по рельсам груженую вагонетку. В первый момент, когда вагонетка только начинает трогаться с места, мы прилагаем к ней максимум усилий, которые по мере увеличения скорости вагонетки будем постепенно уменьшать. При этом мы почувствуем, что вагонетка, обладая инерцией, как бы сопротивляется нашим усилиям. Это противодействие (реакция) вагонетки будет особен-

но сильным вначале, по мере же ослабления наших усилий будет ослабевать и противодействие вагонетки, она постепенно будет переставать «упрямиться» и покорно покатится по рельсам.

Затем мы вовсе перестанем толкать вагонетку и даже, наоборот, начнем понемногу тянуть ее в обратном направлении. При этом мы почувствуем, что вагонетка снова сопротивляется нашим усилиям. Если мы будем все сильнее и сильнее тянуть вагонетку назад, то и ее противодействие будет соответственно все более и более возрастать. Наконец, нам удастся остановить вагонетку и даже изменить направление ее движения. Когда вагонетка покатится обратно, мы будем постепенно ослаблять наши усилия, т. е. будем тянуть ее все слабее и слабее, однако, несмотря на это, скорость вагонетки будет все-таки увеличиваться (при слабом трении в подшипниках).

Когда вагонетка пройдет половину пути в обратном направлении, мы совсем перестанем тянуть ее и снова переменим направление наших усилий, т. е. начнем ее снова задерживать, постепенно увеличивая силу торможения до тех пор, пока вагонетка не остановится, заняв первоначальное (исходное) положение. После этого мы можем продолжать все наши действия сначала.

В этом примере наши усилия, прилагаемые к вагонетке, соответствуют внешней э. д. с., противодействие вагонетки, обусловленное ее инерцией, — э. д. с. самоиндукции, а скорость вагонетки — электрическому току.

Если изобразить графически изменение наших усилий, а также изменение противодействия вагонетки и ее скорости с течением времени, то мы получим графики (фиг. 94,*б*), в точности соответствующие графикам фиг. 94,*а*.

Из этого примера становится более понятной сущность реактивного (безваттного) сопротивления. В самом деле, в течение первой четверти периода мы толкали вагонетку, а она противодействовала нашим усилиям; в течение второй четверти периода она катилась сама, а мы «упирались»; в течение третьей четверти периода мы опять тянули ее, а вагонетка снова оказывала противодействие нашим усилиям и, наконец, в течение четвертой четверти периода она снова катилась сама, а мы ее тормозили.

Короче говоря, в течение первой и третьей четверти периода мы работали «на вагонетку», а в течение второй и четвертой четвертей она работала «на нас», возвращая обратно по-

лученную от нас энергию. В результате наша работа оказалась «безваттной».

Пример 27. Чему равно индуктивное сопротивление дросселя индуктивностью в 20 *гн* для переменного тока 50 *гц*?

Решение:

1) $L = 20$ *гн*; $f = 50$ *гц*.

2) $\omega = 6{,}28 \cdot f = 6{,}28 \cdot 50 = 314$ *рад/сек*.

3) $X_L = \omega L = 314 \cdot 20 = 6\,280$ *ом*.

53. ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Мы знаем, что конденсатор не пропускает через себя постоянного тока. Поэтому в электрической цепи, в которой последовательно с источником тока включен конденсатор, постоянный ток протекать не может.

Фиг. 95. Емкость—гибкость.

а — соотношение фаз зарядо-разрядного тока и внешнего напряжения; *б* — соотношение фаз скорости движения и внешней силы.

Совершенно иначе ведет себя конденсатор в цепи переменного тока (фиг. 95,*а*).

В течение первой четверти периода, когда переменная э. д. с. нарастает, конденсатор заряжается, и поэтому по цепи проходит зарядный электрический ток i, сила которого будет наибольшей вначале, когда конденсатор не заряжен. По мере приближения заряда к концу сила зарядного тока будет уменьшаться. Заряд конденсатора заканчивается и зарядный ток прекращается в тот момент, когда переменная э. д. с. перестает нарастать, достигнув своего амплитудного значения. Этот момент соответствует концу первой четверти периода.

После этого переменная э. д. с. начинает убывать, одновременно с чем конденсатор начинает разряжаться. Следовательно, в течение второй четверти периода по цепи будет протекать разрядный ток. Так как убывание э. д. с. происходит вначале медленно, а затем все быстрее и быстрее, то и сила разрядного тока, имея в начале второй четверти периода небольшую величину, будет постепенно возрастать.

Итак, к концу второй четверти периода конденсатор разрядится, э. д. с. будет равна нулю, а ток в цепи достигнет наибольшего, амплитудного, значения.

С началом третьей четверти периода э. д. с., переменив свое направление, начнет опять возрастать, а конденсатор — снова заряжаться. Заряд конденсатора будет происходить теперь в обратном направлении, соответственно изменившемуся направлению э. д. с. Поэтому направление зарядного тока в течение третьей четверти периода будет совпадать с направлением разрядного тока во второй четверти, т. е. при переходе от второй четверти периода к третьей ток в цепи не изменит своего направления.

Вначале, пока конденсатор не заряжен, сила зарядного тока имеет наибольшее значение. По мере увеличения заряда конденсатора сила зарядного тока будет убывать. Заряд конденсатора закончится и зарядный ток прекратится в конце третьей четверти периода, когда э. д. с. достигнет своего амплитудного значения и нарастание ее прекратится.

Итак, к концу третьей четверти периода конденсатор окажется опять заряженным, но уже в обратном направлении, т. е. на той пластине, где был прежде плюс, будет минус, а где был минус, будет плюс. При этом э. д. с. достигнет амплитудного значения (противоположного направления), а ток в цепи будет равен нулю.

В течение последней четверти периода э. д. с. начинает опять убывать, а конденсатор разряжаться; при этом в цепи появляется постепенно увеличивающийся разрядный ток. Направление этого тока совпадает с направлением тока в первой четверти периода и противоположно направлению тока во второй и третьей четвертях.

Из всего изложенного выше следует, что по цепи с конденсатором проходит переменный ток и что сила этого тока зависит от величины емкости конденсатора и от частоты тока. Кроме того, из фиг. 95,*а*, которую мы построили на основании наших рассуждений, видно, что в чисто емкостной цепи фаза переменного тока опережает фазу напряжения на 90°.

Отметим, что в цепи с индуктивностью ток отставал от напряжения, а в цепи с емкостью ток опережает напряжение. И в том и в другом случае между фазами тока и напряжения имеется сдвиг, но знаки этих сдвигов противоположны. Если в цепи с индуктивностью угол сдвига фаз принять за положительный, то в цепи с емкостью он будет отрицательным.

Мы уже заметили, что ток в цепи с конденсатором может протекать лишь при изменении приложенного к ней напряжения, причем сила тока, протекающего по цепи при заряде и

разряде конденсатора, будет тем больше, чем больше емкость конденсатора и чем быстрее происходят изменения э. д. с.

Емкость, включенная в цепь переменного тока, влияет на силу протекающего по цепи тока, т. е. ведет себя как сопротивление. Величина емкостного сопротивления тем меньше, чем больше емкость и чем выше частота переменного тока. И наоборот, сопротивление конденсатора переменному току увеличивается с уменьшением его емкости и понижением частоты.

Для постоянного тока, т. е. когда частота его равна нулю, сопротивление емкости бесконечно велико; поэтому постоянный ток по цепи с емкостью проходить не может.

Величина емкостного сопротивления определяется по следующей формуле:

$$X_C = \frac{1}{6{,}28 \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega C}, \qquad (24)$$

где X_C — емкостное сопротивление конденсатора в *ом*;
f — частота переменного тока в *гц*;
ω — угловая частота переменного тока;
C — емкость конденсатора в *ф*.

При протекании переменного тока через цепь с емкостью в последней, как и в индуктивности, не затрачивается мощность, так как фазы тока и напряжения сдвинуты друг относительно друга на 90°. Энергия в течение одной четверти периода — при заряде конденсатора — запасается в электрическом поле конденсатора, а в течение другой четверти периода — при разряде конденсатора — отдается обратно в цепь. Поэтому емкостное сопротивление, как и индуктивное, является реактивным или безваттным.

Нужно, однако, отметить, что практически в каждом конденсаторе при прохождении через него переменного тока затрачивается бо́льшая или меньшая активная мощность, обусловленная происходящими изменениями состояния диэлектрика конденсатора. Кроме того, абсолютно совершенной изоляции между пластинами конденсатора никогда не бывает; утечка в изоляции между пластинами приводит к тому, что параллельно конденсатору как бы оказывается включенным некоторое активное сопротивление, по которому течет ток и в котором, следовательно, затрачивается некоторая мощность. И в первом и во втором случае мощность затрачивается совершенно бесполезно на нагревание диэлектрика, поэтому ее называют мощностью потерь.

Потери, обусловленные изменениями состояния диэлектрика, называются диэлектрическими, а потери, обусловленные несовершенством изоляции между пластинами, — потерями утечки.

Ранее мы сравнивали электрическую емкость с вместимостью герметически (наглухо) закрытого сосуда или с площадью дна открытого сосуда, имеющего вертикальные стенки.

При рассмотрении процесса прохождения переменного тока через цепь с емкостью ее целесообразно сравнивать с гибкостью пружины. При этом во избежание возможных недоразумений условимся под гибкостью понимать не упругость («твердость») пружины, а величину, ей обратную, т. е. «мягкость» или «податливость» пружины.

Представим себе, что мы периодически сжимаем и растягиваем спиральную пружину, прикрепленную одним концом наглухо к стене. Время, в течение которого мы будем производить полный цикл сжатия и растяжения пружины, будет соответствовать периоду переменного тока.

Таким образом, мы в течение первой четверти периода будем сжимать пружину, в течение второй четверти периода отпускать ее, в течение третьей четверти периода растягивать и в течение четвертой четверти снова отпускать.

Кроме того, условимся, что наши усилия в течение периода будут неравномерными, а именно: они будут нарастать от нуля до максимума в течение первой и третьей четвертей периода и уменьшаться от максимума до нуля в течение второй и четвертой четвертей.

Сжимая и растягивая пружину таким образом, мы заметим, что в начале первой четверти периода незакрепленный конец пружины будет двигаться довольно быстро при сравнительно малых усилиях с нашей стороны.

В конце первой четверти периода (когда пружина сожмется), наоборот, несмотря на возросшие усилия, незакрепленный конец пружины будет двигаться очень медленно.

В продолжение второй четверти периода, когда мы будем постепенно ослаблять давление на пружину, ее незакрепленный конец будет двигаться по направлению от стены к нам, хотя наши задерживающие усилия направлены по направлению к стене. При этом наши усилия в начале второй четверти периода будут наибольшими, а скорость движения незакрепленного конца пружины наименьшей. В конце же второй четверти периода, когда наши усилия будут наименьшими, скорость движения пружины будет наибольшей и т. д.

Продолжив аналогичные рассуждения для второй половины периода (для третьей и четвертой четвертей) и построив графики (фиг. 95,*б*) изменения наших усилий и скорости движения незакрепленного конца пружины, мы убедимся, что эти графики в точности соответствуют графикам э. д. с. и тока в емкостной цепи (фиг. 95,*а*), причем график усилий будет соответствовать графику э. д. с., а график скорости — графику силы тока

Нетрудно, заметить, что пружина, так же как и конденсатор, в течение одной четверти периода накапливает энергию, а в течение другой четверти периода отдает ее обратно.

Вполне очевидно также, что чем меньше гибкость пружины, т е. чем она более упруга, тем большее противодействие она будет оказывать нашим усилиям. Точно так же и в электрической цепи: чем меньше емкость, тем больше будет сопротивление цепи при данной частоте.

И наконец, чем медленнее мы будем сжимать и растягивать пружину, тем меньше будет скорость движения ее незакрепленного конца. Аналогично этому, чем меньше частота, тем меньше сила тока при данной э. д. с.

При постоянном давлении пружина только сожмется и на этом прекратит свое движение, так же как при постоянной э. д. с. конденсатор только зарядится и на этом прекратится дальнейшее движение электронов в цепи.

Сравнение индуктивности с массой и емкости с гибкостью окажет нам большую помощь при рассмотрении явления резонанса, имеющего огромнейшее значение в радиотехнике.

Пример 28. Определить реактивное сопротивление конденсатора в 0,5 *мкф* переменному току 50 *гц*.

Решение:

1) $f = 50$ *гц*; $C = 0{,}5$ *мкф* $= \frac{0{,}5}{1\,000\,000}$ *ф*.

2) $\omega = 6{,}28 \cdot f = 6{,}28 \cdot 50 = 314$ *рад/сек*.

3) $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot \frac{0{,}5}{1\,000\,000}} = \frac{1\,000\,000}{314 \cdot 0{,}5} = 6\,370$ *ом*.

Пример 29. Вычислить реактивное сопротивление этого же конденсатора переменному току, частота которого равна 500 000 *гц*.

Решение:

1) $f = 500\,000$ *гц*; $C = 0{,}5$ *мкф* $= \frac{0{,}5}{1\,000\,000}$ *ф*.

2) $\omega = 6{,}28 \cdot f = 6{,}28 \cdot 500\,000 = 3\,140\,000$ *рад/сек*.

3) $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{3\,140\,000 \cdot \frac{0{,}5}{1\,000\,000}} = \frac{1\,000\,000}{3\,140\,000 \cdot 0{,}5} = 0{,}637$ *ом*.

54. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Активным, или ваттным, сопротивлением называется всякое сопротивление, поглощающее электрическую энергию или вернее превращающее ее в другой вид энергии, например в тепловую, световую или химическую.

Потери энергии в электрической цепи при переменном токе всегда больше потерь энергии в этой же цепи при постоянном токе. Причина этого заключается в том, что в цепях переменного тока потери энергии обусловлены не только обычным омическим сопротивлением проводников, но и многими другими причинами.

Некоторые из этих причин мы рассмотрим здесь, а некоторые — в следующих главах.

Так, например, наличие конденсатора в цепи переменного тока связано с дополнительными потерями энергии в результате периодического (с частотой переменного тока) изменения поляризации диэлектрика или, попросту говоря, в результате непрерывного переворачивания взад и вперед молекулярных парных зарядов. При этом происходит нагревание диэлектрика, т. е. электрическая энергия превращается в тепловую. Эти потери энергии называются **диэлектрическими потерями**.

Кроме диэлектрических потерь, как уже говорилось раньше, происходят потери энергии из-за утечки тока вследствие несовершенства изоляции между пластинами конденсаторов. Эти потери называются **потерями утечки**.

Вокруг всякого переменного тока существует переменное магнитное поле. Следовательно, во всех окружающих железных предметах происходит непрерывное переворачивание молекулярных магнитиков в такт с частотой переменного тока. В результате железные предметы, находящиеся в поле переменного тока, нагреваются, т. е. электрическая энергия превращается в тепловую. Эти потери называются **потерями на гистерезис**.

Благодаря электромагнитной индукции переменный электрический ток наводит в близлежащих замкнутых электрических цепях индукционные токи, что связано с нагреванием этих цепей, т. е. с дополнительными потерями энергии.

Кроме того, такие же индукционные круговые токи возникают не только в замкнутых электрических цепях, но и в близлежащих металлических предметах и нагревают их. Эти токи называются токами Фуко. Возникновение токов Фуко также сопряжено с потерями электрической энергии[1].

Наконец, при очень высоких частотах цепь переменного тока может излучать электромагнитные волны (радиоволны), что связано с потерями на излучение.

Наличие всех этих потерь увеличивает активное сопротивление цепи переменному току.

Опыт показывает, что при высоких частотах и омическое сопротивление проводника оказывается значительно большим, чем при постоянном токе.

Для объяснения этого явления увеличим мысленно сечение проводника (фиг. 96) и посмотрим, что происходит в нем при прохождении по нему переменного тока. Вдоль проводника взад и вперед с частотой переменного тока движется огромное количество электронов.

До сих пор нам было известно, что движущийся по проводнику переменный поток электронов создает вокруг него переменное магнитное поле. Теперь же, когда мы заглянем внутрь проводника, мы увидим, что магнитное поле имеется и внутри проводника. Это вызвано тем, что каждый электрон при движении создает вокруг себя магнитное поле; а так как часть электронов движется вблизи оси проводника, то они создают магнитное поле не только во вне, но и внутри проводника.

Продолжая присматриваться к происходящему внутри проводника, мы заметим, что наиболее быстро движутся электроны, находящиеся у поверхности проводника, а по мере приближения к середине проводника амплитуда (размах) колебаний электронов становится все меньше и меньше.

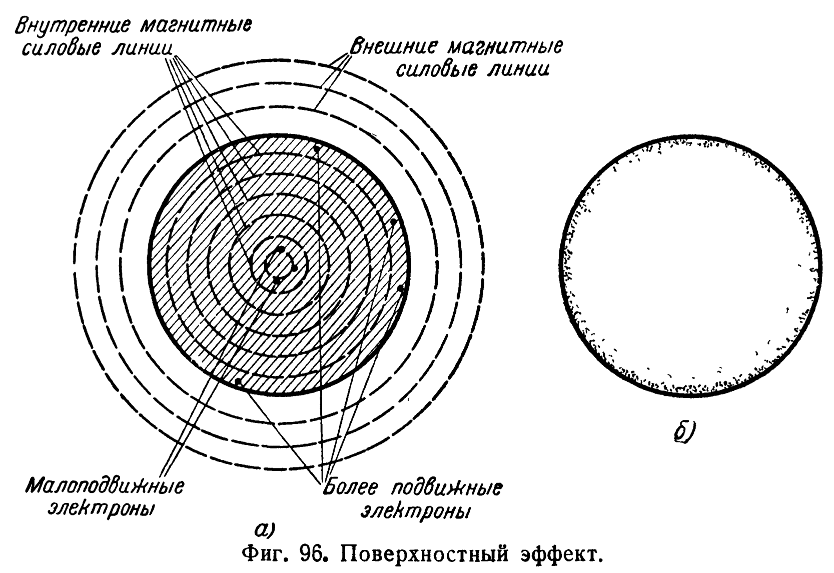
Почему же электроны колеблются с различными амплитудами в разных точках сечения проводника?

Это явление также имеет свое объяснение. Вспомним, что при всяком изменении скорости движения электрона на него

[1] Токи Фуко не всегда являются вредными. Например, на принципе токов Фуко основана защита радиоприборов медными или алюминиевыми экранами от переменных магнитных полей высокой частоты.

действует э. д. с. самоиндукции, противодействующая этому изменению. Вспомним также, что э. д. с. самоиндукции зависит от числа магнитных силовых линий вокруг движущегося электрона. Чем большим числом магнитных силовых линий охватывается электрон, тем труднее ему совершать колебательное движение.

Теперь становится ясным, почему электроны, находящиеся у поверхности проводника, колеблются с большой амплитудой,



Фиг. 96. Поверхностный эффект.

Ток вытесняется магнитным полем на поверхность проводника (*а*), поэтому у поверхности проводника плотность тока больше, чем внутри проводника (*б*).

а электроны, находящиеся глубоко внутри проводника, — с малой. Ведь первые охватываются только теми магнитными силовыми линиями, которые расположены вне проводника, а вторые охватываются и внешними и внутренними магнитными силовыми линиями.

Таким образом, плотность переменного тока получается большей у поверхности проводника и меньшей внутри его.

На фиг. 96,*б* плотность тока характеризуется количеством черных точек. Как видим, наибольшая плотность тока получается около самой поверхности проводника.

При очень высоких частотах противодействие э. д. с. самоиндукции внутри проводника становится настолько силь-

ным, что все электроны движутся только по поверхности проводника. Это явление и называется **поверхностным эффектом**. Так как активное сопротивление проводника зависит от его сечения, а полезным сечением при токе высокой частоты оказывается только тонкий наружный слой проводника, то вполне понятно, что его активное сопротивление увеличивается с повышением частоты.

Для уменьшения поверхностного эффекта проводники, по которым протекают токи высокой частоты, делают трубчатыми и покрывают их слоем хорошо проводящего металла, например серебра.

В целях борьбы с явлением поверхностного эффекта применяют также провода специальной конструкции, так называемый литцендрат. Такой проводник свивают из отдельных тонких медных жилок, имеющих эмалевую изоляцию, причем скрутка жилок производится таким образом, чтобы каждая из них проходила поочередно то внутри проводника, то снаружи его.

Явление поверхностного эффекта особенно сильно сказывается в железных проводах, в которых вследствие большой магнитной проницаемости железа внутренний магнитный поток оказывается особенно большим и поэтому явление поверхностного эффекта становится очень заметным даже при сравнительно низких (звуковых) частотах.

55. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В предыдущих параграфах мы условились называть всякое сопротивление, поглощающее энергию, ваттным, или активным, а сопротивление, не поглощающее энергии, безваттным или реактивным. Кроме того, мы установили, что реактивные сопротивления делятся на два вида — индуктивные и емкостные.

В цепи, содержащей только активное сопротивление, фаза тока всегда совпадает с фазой напряжения (фиг. 92,*а*), т. е. сдвиг фаз тока и напряжения в цепи с чисто активным сопротивлением равен нулю. Отсюда следует, что угол между радиусами-векторами тока и напряжения также равен нулю.

Падение напряжения на активном сопротивлении определяется по формуле

$$U_я = IR. \quad (25)$$

Формула (25) применима как для амплитудных, так и для эффективных значений тока и напряжения.

В цепи, содержащей чисто реактивное сопротивление — индуктивное или емкостное, — фазы тока и напряжения сдвинуты друг относительно друга на четверть периода, причем в чисто индуктивной цепи фаза тока отстает от фазы напряжения (фиг. 94), а в чисто емкостной цепи фаза тока опережает фазу напряжения (фиг. 95). Отсюда следует, что в чисто реактивной цепи угол между радиусами-векторами тока и напряжения всегда равен 90°, причем в чисто индуктивной цепи радиус-вектор тока при вращении движется позади радиуса-вектора напряжения, а в чисто емкостной цепи он движется впереди радиуса-вектора напряжения.

Падения напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях определяются соответственно по формулам

$$U_L = I \cdot \omega \cdot L, \tag{26}$$

$$U_c = \frac{I}{\omega C}. \tag{27}$$

Эти формулы применимы как для амплитудных, так и для эффективных значений тока и напряжения синусоидальной формы. Однако, здесь следует отметить, что они ни в коем случае не применимы для мгновенных значений тока и напряжения, а также и для несинусоидальных токов.

Приведенные выше формулы являются частными случаями закона Ома для переменного тока.

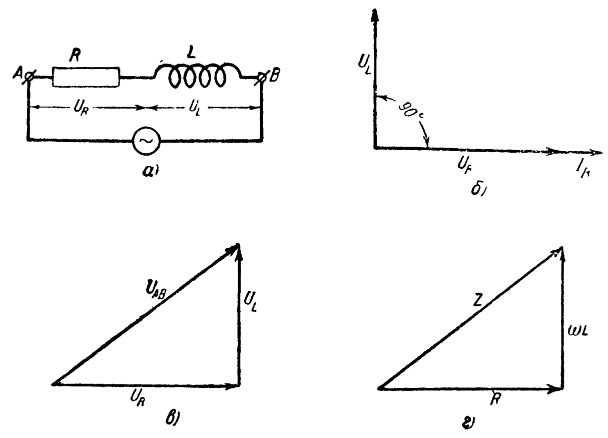
Теперь выясним, как будет выглядеть закон Ома для цепи, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений, соединенных последовательно (фиг. 97).

В любом сечении цепи, изображенной на фиг. 97,*а*, мгновенные значения тока должны быть одинаковыми, так как в противном случае наблюдались бы скопления и разрежения электронов в каких-либо точках цепи. Иными словами, фазы тока по всей длине цепи должны быть одинаковыми. Кроме того, мы знаем, что фаза напряжения на индуктивном сопротивлении опережает фазу тока на 90°, а фаза напряжения на активном сопротивлении совпадает с фазой тока (фиг. 97,*б*). Отсюда следует, что радиус-вектор напряжения U_L (напряжение на индуктивном сопротивлении) и напряжения U_R (напряжение на активном сопротивлении) сдвинуты друг относительно друга на угол в 90°.

Для получения радиуса-вектора результирующего напряжения на зажимах *А* и *В* (фиг. 97,*а*) мы произведем геометрическое сложение радиусов-векторов U_L и U_R. Такое сло-

жение выполнено на фиг. 97,*в*, из которой видно, что результирующий вектор U_{AB} является гипотенузой прямоугольного треугольника.

Из геометрии известно, что квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Это положение наглядно иллюстрируется фиг. 98, из которой видно, что площадь квадрата, построенного на гипотенузе, равна сумме площадей квадратов, построенных на катетах.



Фиг. 97. Полное сопротивление цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

а — схема и обозначения; *б*—сдвиг фаз тока и напряжения; *в*—треугольник напряжений; *г* — треугольник сопротивлений.

Итак:

$$U_{AB}^2 = U_R^2 + U_L^2.$$

По закону Ома напряжение должно равняться силе тока, умноженной на сопротивление.

Так как сила тока во всех точках цепи одинакова, то квадрат полного сопротивления цепи (Z^2) будет также равен сумме квадратов активного и индуктивного сопротивлений, т. е.

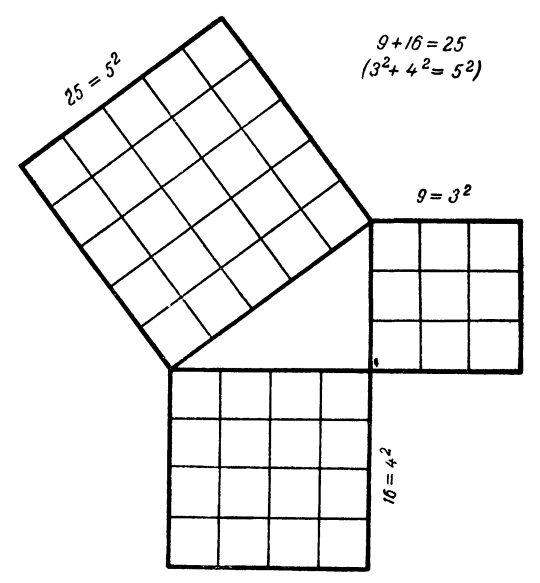
$$Z^2 = R^2 + (\omega L)^2. \qquad (28)$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей этого равенства, получим:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \qquad (28a)$$

Таким образом, полное сопротивление цепи, изображенной на фиг. 97,*а*, равно корню квадратному из суммы квадратов активного и индуктивного сопротивлений.

Полное сопротивление можно находить не только путем вычисления, но и путем построения треугольника сопротивлений, аналогичного треугольнику напряжений (фиг. 97,*г*), т. е. пол-



Фиг. 98. Теорема Пифагора.

Квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов.

ное сопротивление цепи переменному току может быть получено путем измерения гипотенузы, прямоугольного треугольника, катетами которого являются активное и реактивное сопротивления. Разумеется, измерения катетов и гипотенузы должны производиться в одном и том же масштабе. Так, например, если мы условились, что 1 *см* длины катетов соответствует 1 *ом*, то число омов полного сопротивления будет равно числу сантиметров, укладывающихся на гипотенузе.

Полное или, иначе, кажущееся сопротивление цепи, изображенной на фиг. 97,*а*, не является ни чисто активным, ни чисто реактивным; оно содержит в себе оба эти вида сопротивлений. Поэтому угол сдвига фаз тока и напряжения в этой цепи будет отличаться и от 0° и от 90°, т. е. он будет

больше 0°, но меньше 90°. К которому из этих двух значений он будет более близок, будет зависеть от того, какое из этих сопротивлений имеет преобладающее значение в цепи. Если индуктивное сопротивление будет больше ваттного, то угол сдвига фаз будет более близок к 90°, и наоборот, если преобладающим будет ваттное сопротивление, то угол сдвига фаз будет более близок к 0°.

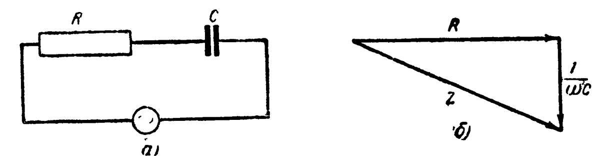
Закон Ома для переменного синусоидального тока в случае последовательного соединения активного и индуктивного сопротивлений выражается следующей формулой:

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{U}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}, \qquad (29)$$

где I — эффективное значение силы тока в *а*;
U — эффективное значение напряжения в *в*;
R — активное сопротивление в *ом*;
ωL — индуктивное сопротивление в *ом*.

Формула (29) будет также действительной, если в нее подставить амплитудные значения тока и напряжения.

В цепи, изображенной на фиг. 99,*а*, соединены последовательно активное и емкостное сопротивления. Полное (кажущее-



Фиг. 99. Полное сопротивление цепи с активным сопротивлением и емкостью.

а — схема и обозначения; *б* — треугольник сопротивлений.

ся) сопротивление такой цепи можно определить при помощи треугольника сопротивлений так же, как мы определяли выше полное сопротивление активно-индуктивной цепи.

Разница между обоими случаями состоит лишь в том, что треугольник сопротивлений для активно-емкостной цепи будет повернут в другую сторону (фиг. 99,*б*) вследствие того, что ток в емкостной цепи не отстает от напряжения, а опережает его.

Для данного случая

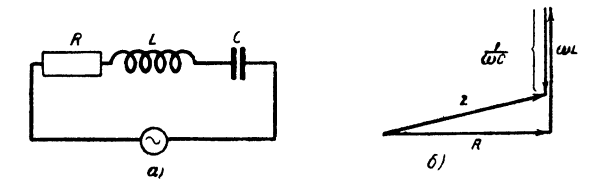
$$Z=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (30)$$

А закон Ома принимает вид:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (31)$$

В общем случае, когда цепь содержит все три вида сопротивлений (фиг. 100,*а*), сначала определяется реактивное сопротивление этой цепи, а затем уже полное — кажущееся.

Реактивное сопротивление этой цепи состоит из индуктивного и емкостного сопротивлений. Так как эти два вида реак-



Фиг. 100. Полное сопротивление цепи содержащей *R*, *L* и *C*.
а — схема и обозначения; *б* — треугольник сопротивлений.

тивного сопротивления противоположны друг другу по своему характеру, то общее реактивное сопротивление цепи будет равно их разности, т. е.

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}. \qquad (32)$$

Общее реактивное сопротивление цепи может иметь индуктивный или емкостный характер, в зависимости от того, какое из этих двух сопротивлений (X_L или X_C) преобладает.

После того как мы по формуле (32) определили общее реактивное сопротивление цепи, определение полного сопротивления не представит затруднений. Полное сопротивление будет равно корню квадратному из суммы квадратов активного и реактивного сопротивлений, т. е.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad (33)$$

или

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (33а)$$

Способ построения треугольника сопротивлений для этого случая изображен на фиг. 100,*б*.

Закон Ома при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений будет выглядеть так:

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{U}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \qquad (34)$$

где I—сила тока в *а*;

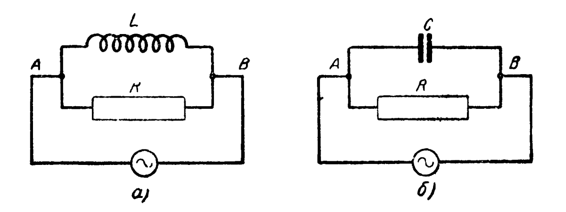
U—напряжение в *в*;

R—активное сопротивление в *ом*;

ωL—индуктивное сопротивление в *ом*;

$\frac{1}{\omega C}$—емкостное сопротивление в *ом*.

Формула (34) верна только для эффективных и амплитудных значений синусоидального тока и напряжения.



Фиг. 101. Параллельное соединение активного и реактивного сопротивлений.

а — параллельное соединение R и L; *б* — параллельное соединение R и C.

Для того чтобы вычислить полное (кажущееся) сопротивление цепи, составленной из активного и индуктивного сопротивлений, соединенных между собой параллельно (рис. 101, *а*), нужно сначала вычислить проводимость каждой из параллельных ветвей, потом определить полную (кажущуюся) проводимость всей цепи между точками A и B и затем вычислить полное (кажущееся) сопротивление цепи между этими точками.

Проводимость активной ветви, как известно, равна $\frac{1}{R}$, аналогично проводимость индуктивной ветви равна $\frac{1}{\omega L}$, а полная проводимость равна $\frac{1}{Z}$.

Полная проводимость равна корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной проводимости, т. е.

$$\frac{1}{Z}=\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}.$$

Приводя к общему знаменателю подкоренное выражение, получим:

$$\frac{1}{Z}=\sqrt{\frac{(\omega L)^2+R^2}{R^2(\omega L)^2}}=\frac{\sqrt{(\omega L)^2+R^2}}{R\omega L},$$

откуда:

$$Z=\frac{R\omega L}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}. \qquad (35)$$

Формула (35) служит для вычисления полного сопротивления цепи, изображенной на фиг. 101,*а*.

Нахождение полного сопротивления для этого случая может быть произведено и геометрическим путем. Для этого нужно построить в соответствующем масштабе треугольник сопротивлений и затем произведение длин катетов разделить на длину гипотенузы. Полученный результат и будет соответствовать полному сопротивлению.

Аналогично случаю, рассмотренному выше, полное сопротивление при параллельном соединении R и C (фиг. 101,*б*) будет равно:

$$Z=\frac{R\cdot\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (36)$$

Полное сопротивление может быть найдено также и в этом случае путем построения треугольника сопротивлений.

В радиотехнике наиболее часто встречается случай параллельного соединения индуктивности и емкости, например колебательный контур для настройки приемников и передатчиков. Так как катушка индуктивности всегда обладает кроме индуктивного еще и активным сопротивлением, то эквивалентная (равноценная) схема колебательного контура будет содержать в индуктивной ветви активное сопротивление (фиг. 103).

Формула полного (кажущегося) сопротивления для этого случая будет:

$$Z=\frac{\sqrt{R^2+(\omega L)^2\cdot\frac{1}{\omega C}}}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (37)$$

Так как обычно активное сопротивление катушки (R) бывает очень мало по сравнению с ее индуктивным сопротивлением (ωL), то мы имеем право формулу (37) переписать в следующем виде:

$$Z=\frac{\sqrt{(\omega L)^2\cdot\frac{1}{\omega C}}}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}=\frac{\frac{L}{C}}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (37а)$$

В колебательном контуре обычно подбирают величины L и C таким образом, чтобы индуктивное сопротивление равнялось емкостному, т. е. чтобы соблюдалось условие

$$\omega L=\frac{1}{\omega C}.$$

При соблюдении этого условия полное сопротивление колебательного контура будет равно:

$$Z_0=\frac{L}{CR}, \quad (37б)$$

где L — индуктивность катушки в *гн*;
C — емкость конденсатора в *ф*;
R — активное сопротивление катушки в *ом*.

Пример 30. Чему равно полное сопротивление для переменного тока частотой в 50 *гц* цепи, составленной из дросселя, индуктивностью 20 *гн*, сопротивления 500 *ом* и конденсатора емкостью 0,5 *мкф*, соединенных последовательно?

Решение:

1) $f=50$ *гц*; $L=20$ *гн*; $X_L=\omega L=6\,280$ *ом*;
$R=500$ *ом*; $C=0{,}5$ *мкф*; $X_c=\frac{1}{\omega C}=6\,370$ *ом*.

2) $Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}=$
$=\sqrt{500^2+(6\,280-6\,370)^2}=\sqrt{500^2+(-90)^2}=$
$=\sqrt{250\,000+8\,100}=508$ *ом*.

($Z\approx R$, т. е. частота $f=50$ *гц* близка к резонансной частоте).

Пример 31. Вычислить полное сопротивление для тока частотой в 500 *гц* цепи, составленной из дросселя и сопротивления предыдущего примера, соединенных между собой параллельно.

Решение:

1) $f=500$ *гц*; $L=20$ *гн*: $X_L=\omega L=62\,800$ *ом*.

2) $Z=\frac{R\omega L}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}=\frac{500\cdot 62\,800}{\sqrt{250\,000+3\,943\,840\,000}}\approx 500$ *ом*.

Пример 32. Вычислить полное сопротивление конденсатора емкостью 0,5 *мкф* и сопротивления в 500 *ом*, соединенных между собой параллельно. Частота тока равна 500 *гц*.

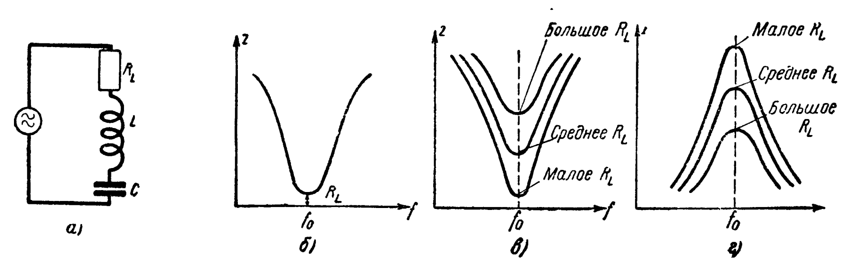
Решение:

1) $f=500$ *гц*; $C=0{,}5$ *мкф*; $X_c=\frac{1}{\omega C}=637$ *ом*.

2) $Z=\frac{R\cdot\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}=\frac{318\,500}{\sqrt{250\,000+405\,769}}\approx 390$ *ом*.

56. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

В радиотехнике широкое применение имеют электрические цепи, составленные из катушки индуктивности и конденсатора. Такие цепи в радиотехнике называются колебательными кон-



Фиг. 102. Резонанс напряжений,

а — схема и обозначения; *б* — график изменения полного сопротивления с частотой; *в* — зависимость кажущегося сопротивления от величины активного сопротивления R_l; *г* — кривые резонанса.

турами. Источник переменного тока к колебательному контуру может быть присоединен двумя способами: последовательно (фиг. 102) и параллельно (фиг. 103).

Рассмотрим поведение колебательного контура в цепи переменного тока при последовательном соединении контура и источника тока (фиг. 102).

Мы знаем, что такая цепь оказывает переменному току кажущееся сопротивление, равное:

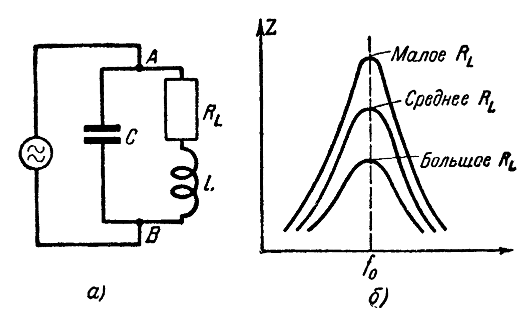
$$Z=\sqrt{R_L^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

где R_L — активное сопротивление катушки индуктивности в *ом*;

ωL — индуктивное сопротивление катушки индуктивности в *ом*;

$\frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление конденсатора в *ом*.

Первое из этих сопротивлений (R_L) практически очень мало изменяется при изменении частоты (если пренебречь



Фиг. 103. Резонанс токов.

а — схема и обозначения; *б* — графики полного сопротивления.

поверхностным эффектом); второе же и третье в очень сильной степени зависят от частоты, а именно: индуктивное сопротивление ωL увеличивается прямо пропорционально частоте тока, а емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega C}$ уменьшается при повышении частоты тока, т. е. оно связано с частотой тока обратно пропорциональной зависимостью.

Отсюда непосредственно следует, что кажущееся сопротивление колебательного контура также зависит от частоты, и колебательный контур будет оказывать токам разных частот неодинаковое сопротивление.

Если мы будем измерять кажущееся сопротивление колебательного контура при различных частотах, то обнаружим, что в области низких частот сопротивление контура очень ве-

лико; при увеличении частоты оно уменьшается до некоторого предела, а затем начинает снова возрастать.

Объясняется это тем, что в области низких частот ток испытывает большое сопротивление со стороны конденсатора, при увеличении же частоты начинает действовать индуктивное сопротивление, компенсирующее действие емкостного сопротивления. При некоторой частоте индуктивное сопротивление становится равным емкостному, т. е.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Они будут взаимно компенсировать друг друга и общее реактивное сопротивление контура станет равным нулю:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0.$$

При этом кажущееся сопротивление колебательного контура будет равно только его активному сопротивлению, так как

$$Z = \sqrt{R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R_L^2} = R_L.$$

При дальнейшем повышении частоты ток будет испытывать все большее и большее сопротивление со стороны индуктивности катушки, при одновременном уменьшении компенсирующего действия емкостного сопротивления. Поэтому кажущееся сопротивление контура начнет снова возрастать. На фиг. 102,*б* приведена кривая, показывающая изменение кажущегося сопротивления колебательного контура при изменении частоты тока.

Частота тока, при которой сопротивление колебательного контура делается наименьшим, называется частотой резонанса или резонансной частотой колебательного контура.

При резонансной частоте имеет место равенство

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

пользуясь которым, нетрудно определить частоту резонанса:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (38)$$

Единицами в этих формулах служат герцы, генри и фарады.

Из формулы (38) видно, что чем меньше величины емкости и самоиндукции колебательного контура, тем больше будет его резонансная частота.

Величина активного сопротивления R_L не влияет на резонансную частоту, однако от нее зависит характер изменения Z. На фиг. 102,*в* приведен ряд кривых изменения кажущегося сопротивления колебательного контура при одних и тех же величинах L и C, но при разных R_L. Из этой фигуры видно, что чем больше активное сопротивление контура, тем тупее становится кривая изменения кажущегося сопротивления.

Теперь рассмотрим, как будет изменяться сила тока в колебательном контуре, если мы будем изменять частоту тока. При этом мы будем считать, что напряжение, развиваемое источником переменного тока, остается все время одним и тем же.

Так как источник тока включен последовательно с L и C контура, то сила тока, протекающего через катушку и конденсатор, будет тем больше, чем меньше кажущееся сопротивление колебательного контура в целом, так как

$$I_L = I_C = \frac{U}{\sqrt{R_l^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Отсюда непосредственно следует, что при резонансе сила тока в колебательном контуре будет наибольшей. Величина тока при резонансе будет зависеть от напряжения источника переменного тока и от активного сопротивления контура:

$$I_0 = \frac{U}{\sqrt{R_L^2 + 0}} = \frac{U}{R_L}.$$

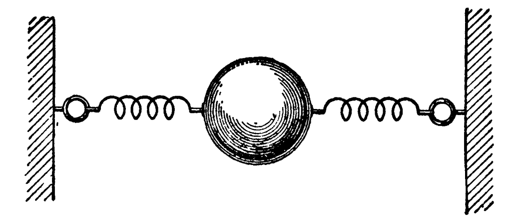
На фиг. 102,*г* изображен ряд кривых изменения силы тока в колебательном контуре при изменении частоты тока так называемых кривых резонанса. Из этой фигуры видно, что чем больше активное сопротивление контура, тем тупее кривая резонанса.

При резонансе сила тока может достигать огромных значений при сравнительно малой внешней э. д. с. Поэтому падения напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях контура, т. е. на катушке и на конденсаторе, могут достигать

очень больших величин и далеко превосходить величину внешнего напряжения.

Последнее утверждение на первый взгляд может показаться несколько странным, однако нужно помнить, что фазы напряжений на емкостном и индуктивном сопротивлениях сдвинуты друг относительно друга на 180°, т. е. мгновенные значения напряжений на катушке и конденсаторе направлены всегда в противоположные стороны. Вследствие этого большие напряжения, существующие при резонансе внутри контура на его катушке и конденсаторе, ничем не обнаруживают себя вне контура, взаимно компенсируя друг друга.

Разобранный нами случай последовательного резонанса называется резонансом напряжений, так как в этом случае в момент резонанса имеет место резкое увеличение напряжения на L и C колебательного контура.



Фиг. 104. Механическая модель колебательного контура.

Масса — индуктивность, гибкость — емкость, трение — сопротивление.

Попытаемся теперь раскрыть сущность явления резонанса.

Явления резонанса связаны с периодическим колебательным движением электронов в контуре и состоят в том, что электроны в данном колебательном контуре легче всего «раскачиваются» с какой-то определенной частотой, которую мы называем резонансной. С периодическим колебательным движением мы встречаемся повсеместно. Колебания маятника, дрожание струны, движение качелей — все это примеры колебательного движения.

Для примера рассмотрим колебательную систему, изображенную на фиг. 104. Эта система, как мы увидим дальше, имеет много общего с электрическим колебательным контуром. Состоит она из двух пружин и массивного шара, укрепленных между двумя опорами.

Если мы оттянем шар в какую-либо сторону, например, влево от положения равновесия, то он под действием пружин немедленно устремится обратно; однако приобретя некоторую скорость шар не остановится в точке равновесия, а по инерции проскочит дальше, чем вызовет новую деформацию (сжатие и растяжение) пружин. Затем этот процесс повторится

в обратном направлении и т. д. Шар будет колебаться в ту и другую сторону до тех пор, пока не израсходуется на трение весь запас энергии, сообщенной пружинам при отклонении шара.

Нетрудно заметить, что при колебаниях шара энергия, сообщенная системе, все время переходит из энергии деформации (сжатия и растяжения) пружин в энергию движения шара и обратно. В механике первый вид энергии называется потенциальной энергией, а второй вид — кинетической

В то время, когда шар находится в одном из крайних положений, он на мгновение останавливается. В этот момент энергия его движения равна нулю. Зато пружины в этот момент очень сильно деформированы: одна сжата, а другая растянута; в них, следовательно, заключено наибольшее количество энергии. В тот же момент, когда шар с наибольшей скоростью проходит через положение равновесия, он обладает наибольшей энергией, но зато энергия пружин в этот момент равна нулю, так как они не сжаты и не растянуты.

Отклоняя шар на различные расстояния и наблюдая каждый раз за частотой последующих свободных колебаний системы, мы заметим, что частота колебаний системы остается все время одной и той же. Иными словами, она не зависит от величины начального отклонения. Эту частоту мы будем называть собственной частотой колебаний системы.

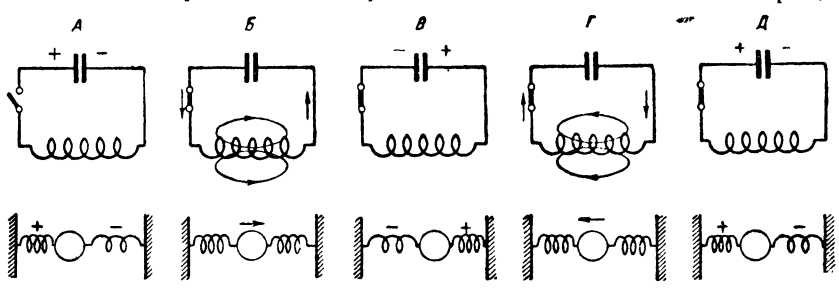
Если бы мы имели в своем распоряжении не одну такую систему, а несколько, то мы могли бы убедиться в том, что собственная частота свободных колебаний системы уменьшается с увеличением массы шара и увеличивается с увеличением упругости, т. е. с уменьшением гибкости пружин. Эта зависимость может быть обнаружена и на более простом примере с колеблющимися струнами различной толщины и различной степени натяжения.

Если мы пожелаем раскачать шар с наименьшей затратой усилий, то мы, безусловно, постараемся, во-первых, установить строгую периодичность наших толчков, т. е. постараемся, чтобы толчки следовали друг за другом через определенное время, а во-вторых, постараемся, чтобы промежуток времени между толчками равнялся периоду собственных колебаний системы. Для того чтобы раскачать колебательную систему с наименьшей затратой усилий, нужно частоту вынуждающей силы сделать равной собственной частоте колебания системы. Это правило очень хорошо известно всем нам еще с детского возраста, когда мы его применяли, раскачиваясь на качелях.

Итак, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебаний системы, амплитуда колебаний становится наибольшей.

Читатель уже, конечно, заметил, что совпадение частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний системы и является резонансом.

За примерами резонанса ходить далеко не нужно. Оконное стекло, дрожащее с определенной частотой каждый раз,



Фиг. 105. Свободные колебания.

Вверху — электрические, внизу — механические.

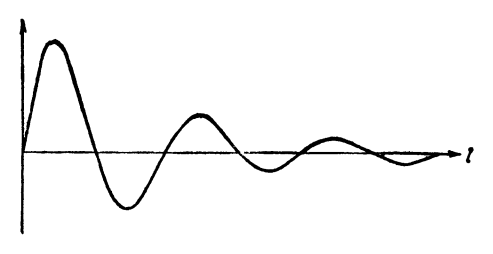
когда мимо проезжает трамвай или грузовая машина; дрожание струны музыкального инструмента после того, как мы прикоснулись к соседней струне, настроенной в унисон с первой, и т. п. — все это явления резонанса.

Зарядим конденсатор некоторым количеством электричества (фиг. 105,*А*) и замкнем его после этого на катушку индуктивности (фиг. 105,*Б*). Конденсатор начнет немедленно разряжаться. Через катушку индуктивности потечет разрядный ток, а появление тока в катушке приведет к возникновению магнитного поля вокруг нее. При этом в катушке возникнет э. д. с. самоиндукции, которая будет задерживать разряд конденсатора. Когда конденсатор разрядится, то ток в катушке не прекратится, так как он будет теперь поддерживаться э. д. с. самоиндукции за счет энергии, запасенной в магнитном поле катушки во время разряда конденсатора. Этот продолжающийся ток перезарядит конденсатор в обратном направлении, т. е. та пластина, которая была прежде положительной, станет отрицательной, и наоборот (фиг. 105,*В*).

После этого конденсатор снова начнет разряжаться, снова перезарядится (фиг. 105 *Г* и *Д*) и т. д. Колебания тока в контуре будут продолжаться до тех пор, пока вся электрическая энергия, сообщенная контуру при заряде конденсатора, не

превратится в тепловую энергию. Это произойдет тем скорее, чем больше активное сопротивление контура.

Итак, разряд конденсатора через катушку индуктивности является колебательным процессом. Во время этого процесса конденсатор несколько раз заряжается и разряжается, энергия поочередно переходит из электрического поля конденсатора в магнитное поле катушки и обратно.



Фиг. 106. График колебательного разряда конденсатора на катушку индуктивности.

Колебания тока, имеющие место при этом разряде, носят затухающий характер (фиг. 106).

Частота колебаний при выбранных величинах емкости и индуктивности является величиной вполне определенной и называется собственной частотой контура. Собственная частота контура будет тем больше, чем меньше величины емкости и индуктивности контура.

Таблица 5

Электрические величины (фиг. 105, верх)	Механические величины (фиг. 105, низ)
Индуктивность колебательного контура	Масса шара
Емкость колебательного контура	Гибкость пружин
Активное сопротивление контура	Механическое трение
Пластины конденсатора	Пружины
Заряд конденсатора	Деформация (сжатие и растяжение) пружин
Положительный заряд пластин	Сжатие пружины
Отрицательный заряд пластины	Растяжение пружины
Сила тока	Скорость движения шара
Направление тока	Направление движения шара
Электродвижущая сила самоиндукции	Сила инерции шара
Амплитуда (наибольшее мгновенное значение тока)	Амплитуда (наибольшее отклонение шара от положения равновесия)
Частота (число циклов в секунду)	Частота (число колебаний в секунду)
Резонанс (совпадение частоты внешней э. д. с. с собственной частотой контура)	Резонанс (совпадение частоты толчков вынуждающей силы с собственной частотой колебаний шара)

Если в колебательный контур ввести источник переменного тока, частота которого совпадает с собственной частотой контура, то колебания в контуре достигнут наибольшей величины, т. е. будет иметь место явление резонанса.

Между электрическими и механическими колебаниями может быть проведена далеко идущая параллель.

В табл. 5 слева даны электрические величины и явления, а справа аналогичные им величины и явления из области механики применительно к нашей механической модели колебательного контура.

Различные моменты электрического колебания и соответствующие им моменты колебания нашей механической модели колебательного контура изображены на фиг. 105.

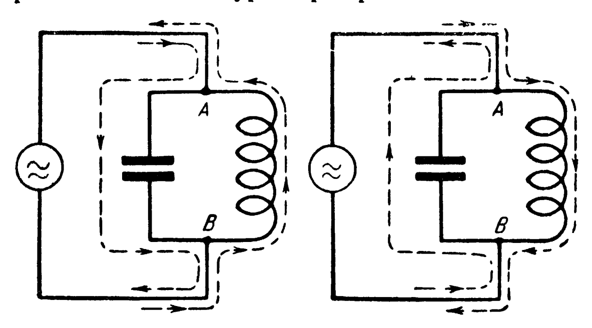
57. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Перейдем теперь к рассмотрению случая параллельного соединения колебательного контура с источником тока (фиг. 103) и посмотрим, каково будет сопротивление контура для токов различных частот в этом случае. Если частота тока невелика (ниже резонансной), то почти весь ток пойдет по наиболее легкому для него пути — через индуктивную ветвь; сопротивление контура при низких частотах будет небольшим по величине и индуктивным по своему характеру.

Для токов высоких частот (выше резонансной) более легким путем будет путь через емкостную ветвь, и, следовательно, сопротивление контура будет также небольшим по величине, но емкостным по характеру.

При резонансной частоте, когда емкостное сопротивление равно индуктивному, путь для тока будет одинаково трудным через обе ветви. Мы знаем, что при параллельном соединении двух равных сопротивлений общее сопротивление равняется половине любого из них. Поэтому, казалось бы, что сопротивление контура при резонансе должно равняться половине одного из реактивных сопротивлений. Однако, не следует забывать, что мы имеет дело с сопротивлениями, хотя и одинаковыми по величине, но имеющими принципиально различный характер. Это различие проявляется в том, что токи в индуктивной и емкостной ветвях контура сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180°. Отсюда непосредственно следует, что в неразветвленной части цепи всегда протекает не суммарный, а разностный ток (фиг. 107). Поэтому при резонансе, когда токи в емкостной и индуктивной ветвях равны между собой, ток в неразветвленной части цепи будет равен

нулю, какое бы напряжение мы ни прилагали к контуру. При резонансе между точками AB цепь будет казаться разорванной, т. е. сопротивление ее между этими точками будет бесконечно велико, а отнюдь не будет равным половине одного из реактивных сопротивлений. Практически бесконечно большого сопротивления контура при резонансе не бывает, так



Фиг. 107. Токи при параллельном резонансе.

В неразветвленной части цепи протекает не суммарный, а разностный ток.

как из-за наличия активного сопротивления в контуре (сопротивление провода катушки) сдвиг фаз токов никогда не может быть равным точно 180°.

Однако активное сопротивление катушки обычно бывает много меньше ее индуктивного сопротивления, и поэтому сопротивление колебательного контура при резонансе может достигать очень больших величин.

Сопротивление колебательного контура при параллельном резонансе равно:

$$Z = \frac{L}{CR_L},$$

где L выражено в *гн*, C — в *ф*, R_L — в *ом*.

Полное сопротивление колебательного контура при резонансе является чисто активным в силу того обстоятельства, что индуктивное и емкостное сопротивления взаимно компенсируются.

Кривые изменения кажущегося сопротивления колебательного контура между точками AB при изменении частоты тока приведены на фиг. 103,*б*.

При параллельном резонансе токи в ветвях контура достигают наибольшей величины; поэтому параллельный резонанс называется резонансом токов.

Явление резонанса имеет огромнейшее значение в радиотехнике. На земном шаре имеется большое количество передающих радиостанций. Передачи всех этих радиостанций распространяются в эфире и все одновременно принимаются приемной антенной. Нетрудно представить себе, каким получилось бы нагромождение друг на друга передач, если бы мы не могли выделить из этого хаоса только одну нужную нам. Вот тут-то на помощь приходит явление резонанса. Передающие радиостанции излучают в пространство электромагнитную энергию на различных частотах, мы же, настраивая контуры нашего приемника в резонанс с той или иной частотой, тем самым выбираем нужную нам передачу.

58. ПРОСТЕЙШИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ

Магнитоэлектрические измерительные приборы, применяемые для измерения постоянного тока и напряжения (фиг. 74), не пригодны для измерения переменных токов вообще и высокочастотных в частности.

Для измерения переменных токов применяются чаще всего так называемые тепловые измерительные приборы. Устройство тепловых измерительных приборов основано на тепловом действии тока. Известно, что при нагревании почти все металлы увеличиваются в объеме, а при охлаждении — уменьшаются. Металлический проводник, по которому протекает электрический ток, нагревается и вследствие этого удлиняется.

Фиг. 108 Устройство теплового измерительного прибора.

В результате нагревания током нити *ВГ* она удлиняется и стрелка прибора отклоняется вправо.

Схема устройства теплового измерительного прибора изображена на фиг. 108. Зажимы, при помощи которых прибор включается в цепь тока, обозначены буквами *А* и *Б*. При протекании через прибор тока проводник *ВГ* нагревается. В результате нагревания происходит удлинение этого проводника и пружина *Д* перемещает стрелку прибора вправо по шкале.

Приборы этого типа не обеспечивают большой точности измерений. Обычно она составляет около 10% максимального значения тока или напряжения по шкале прибора.

Тепловые приборы показывают эффективное значение переменного тока. Они пригодны также и для измерений постоянного тока, но менее удобны, чем магнитоэлектрические приборы, из-за неравномерной шкалы и меньшей точности измерений.

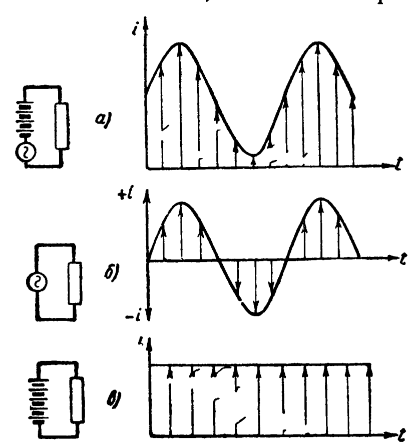
Кроме тепловых приборов существуют приборы электродинамические, электростатические и электромагнитные. Все эти приборы пригодны для измерений как переменного, так и постоянного тока.

В радиотехнике приходится иметь дело также с приборами, основанными на принципах термоэлектричества и детектирования. Эти приборы применяются чаще всего для измерения токов высокой частоты.

59. ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ТОК

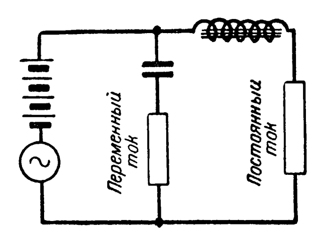
Мы познакомились с постоянным и переменным токами. Постоянным током мы называем ток, который не изменяется ни по величине, ни по направлению. Переменный же ток, наоборот, все время изменяется и по величине и по направлению.

Кроме них существуют также токи, направление которых постоянно, а величина все время изменяется.



Фиг. 109. График пульсирующего тока.

а — направление пульсирующего тока не изменяется, изменяется только его величина; *б* — переменная составляющая пульсирующего тока; *в* — постоянная составляющая пульсирующего тока.



Фиг. 110. Схема для разделения переменной и постоянной составляющих пульсирующего тока.

Переменной составляющей легче пройти через конденсатор, чем через дроссель, а постоянная составляющая может пройти только через дроссель.

Такие токи называются пульсирующими. С пульсирующими токами в радиотехнике приходится иметь дело очень часто. Анодные токи ламп передатчика, приемника и усилителя,

токи, текущие через микрофон или телефон, — все это пульсирующие токи.

При пульсирующем токе электроны в проводнике движутся все время в одном направлении, но их движение то убыстряется, то замедляется. Движение каждого отдельного электрона в этом случае походит на движение пассажира, прогуливающегося взад и вперед по вагону движущегося поезда. Пассажир движется вместе с поездом все время вперед, но скорость его движения убыстряется, когда он идет по ходу поезда, и замедляется, когда он идет обратно.

Всякий пульсирующий ток можно представить в виде суммы двух токов — постоянного и переменного. Необходимым условием является только, чтобы постоянный ток был больше амплитудного значения переменного тока.

На фиг. 109 изображен график пульсирующего тока, а также графики постоянного и переменного токов, из которых он состоит.

Постоянный и переменный токи, входящие в состав пульсирующего тока, называются соответственно его **постоянной и переменной составляющими**.

Постоянную и переменную составляющие пульсирующего тока можно легко отделить друг от друга, т. е. получить отдельно переменный ток и отдельно постоянный.

Пример такого разделения показан на фиг. 110.

Переменная составляющая направляется по наиболее легкому для нее пути через конденсатор, а постоянная составляющая — через дроссель.

60. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ

С синусоидальными токами в более или менее чистом виде приходится иметь дело только в электротехнике. В радиотехнике же, как правило, приходится иметь дело с несинусоидальными токами. Переменная составляющая тока, проходящего через микрофон или телефон, создается звуковыми колебаниями, которые в большинстве случаев являются несинусоидальными.

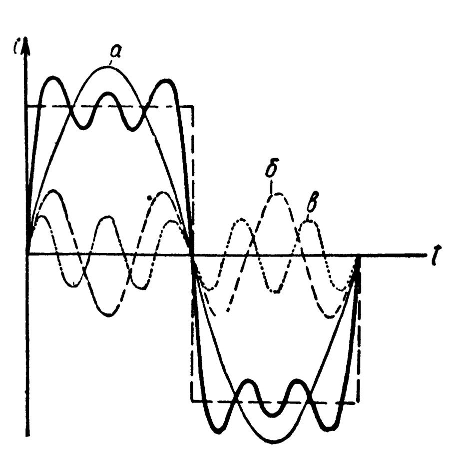
Несмотря на это, изучение переменных синусоидальных токов совершенно необходимо для радиотехника. Дело в том, что любой периодический несинусоидальный ток можно представить в виде суммы нескольких синусоидальных токов.

Например, несинусоидальный периодический ток, график которого изображен на фиг. 86, можно довольно точно пред-

ставить в виде суммы трех синусоидальных токов. Графики этих токов и их суммирование показано на фиг. 111.

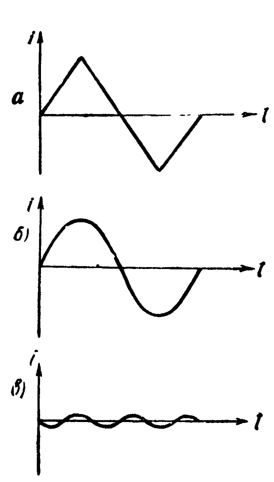
На фиг. 112 произведено разложение несинусоидального тока другой формы на его синусоидальные составляющие.

Весьма любопытно то, что при всяком разложении несинусоидального периодического тока на его синусоидальные составляющие частоты последних всегда относятся между



Фиг. 111. Получение несинусоидального прямоугольного тока из трех синусоидальных.

Складывая мгновенные значения синусоидальных токов (*а*), (*б*) и (*в*), получаем график тока почти прямоугольной формы.



Фиг. 112. Разложение несинусоидального пилообразного тока на синусоидальные составляющие (гармоники).

Ток пилообразной формы состоит из синусоидальных токов (гармоник), частоты которых относятся как целые числа 1, 3, 5, 7 и т. д.

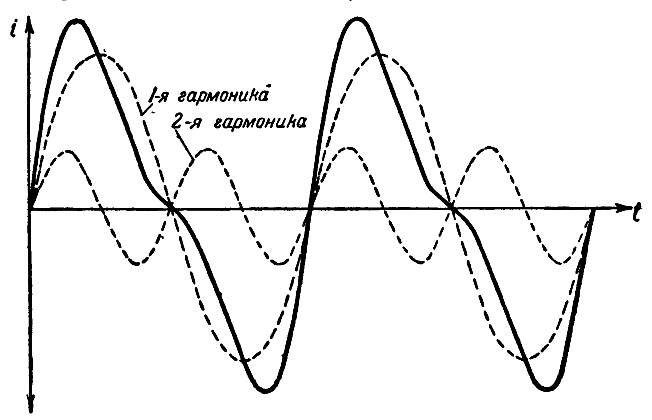
собой как целые числа (1, 2, 3, 4 и т. д.) Например, в случаях, изображенных на фиг. 111 и 112, частоты синусоидальных составляющих относятся, как 1, 3 и 5.

Для более точного воспроизведения заданных кривых (фиг. 111 и 112) потребуется ввести составляющие с более высокими частотами, которые будут в 7, 9, 11 и т. д. раз больше самой низкой или, как говорят, основной частоты.

Все составляющие несинусоидального тока называются его г а р м о н и к а м и, причем составляющая, имеющая самую низкую частоту, называется первой гармоникой, составляющая с вдвое большей частотой — второй гармоникой и т. д.

Наличие тех или иных гармоник, а также их амплитуды и фазы зависят от формы несинусоидального тока. В примерах, изображенных на фиг. 111 и 112, присутствуют только нечетные гармоники. В других случаях могут быть только четные гармоники или те и другие вместе (фиг. 113).

Выше всюду речь шла о периодических несинусоидальных токах, т. е. о таких токах, все значения которых повторяются через определенный период времени. Непериодические токи также можно представить в виде суммы синусоидальных составляющих, однако в этом случае число этих составляющих будет бесконечно большим, а частоты соседних составляющих будут отличаться одна от другой на бесконечно малые величины. Таким образом, непериодические токи, например токи от атмосферных помех, можно представить лишь в виде сплошного спектра синусоидальных колебаний, в котором будут иметься токи всех частот. Именно поэтому задача борьбы с атмосферными помехами до сих пор не нашла удовлетворительного решения.



Фиг. 113. Несинусоидальный ток, в состав которого входят только 1-я и 2-я гармоники.

При разложении этого тока на синусоидальные составляющие будут получаться только первая и вторая гармоники.

61. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему индуктивные и емкостные сопротивления называются реактивными и безваттными?

2. Для чего служат дроссели?

3. Почему индуктивное сопротивление увеличивается при повышении частоты?

4. Почему емкостное сопротивление при повышении частоты уменьшается?

5. Почему потери при переменном токе больше, чем при постоянном?

6. Что такое поверхностный эффект?

7. Как производится сложение активного сопротивления с реактивным?

8. Как определить общее реактивное сопротивление индуктивности и емкости при последовательном их соединении?

9. Почему при наличии в колебательном контуре больших потерь его резонансная кривая становится тупой?

10. Что такое резонанс?

11. В чем разница между резонансом токов и резонансом напряжений?

12. На чем основано действие тепловых измерительных приборов?

13. Чем отличается пульсирующий ток от переменного и постоянного токов?

14. Как можно отделить переменную составляющую пульсирующего тока от постоянной?

15. Что такое гармоники?

16. Можно ли разложить на гармоники непериодический ток?

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

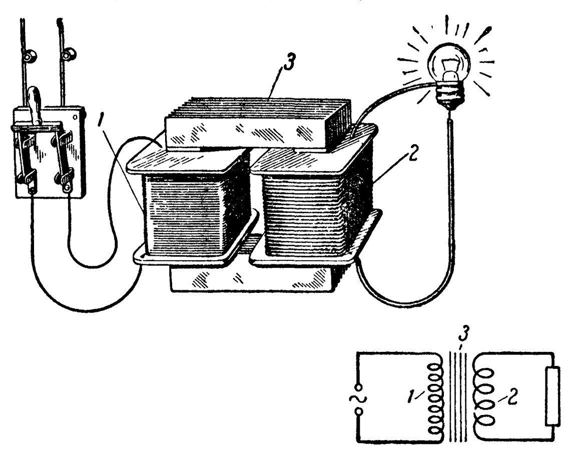
62. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Трансформаторами и автотрансформаторами называются приборы для передачи электрической энергии переменного тока из одной цепи в другую, при помощи электромагнитной индукции. В основу устройства трансформаторов положен тот факт, что при наличии индуктивной связи между электрическими цепями всякое изменение тока в одной из них вызывает э. д. с. индукции в другой.

Трансформатор состоит из железного сердечника и двух или больше обмоток из изолированного провода. Обмотка, присоединяемая к источнику переменного тока, называется **первичной**. Обмотка же, в которой наводится э. д. с. индукции, называется **вторичной**. К вторичной обмотке присоединяется нагрузка, например цепь накала радиоламп. Вторичных обмоток может быть не одна, а несколько. На фиг. 114 приведен внешний вид и схематическое изображение трансформатора с двумя обмотками одной первичной и одной вторичной.

Принцип действия трансформатора заключается в следующем.

При протекании переменного тока по виткам первичной обмотки в железном сердечнике трансформатора создается переменное магнитное поле. Силовые линии этого поля пересекая витки вторичной обмотки наводят в них э. д. с. индукции. Железный сердечник в трансформаторе служит для уве-



Фиг. 114. Внешний вид и схематическое изображение простейшего трансформатора.

1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмогка; 3 — железный сердечник,

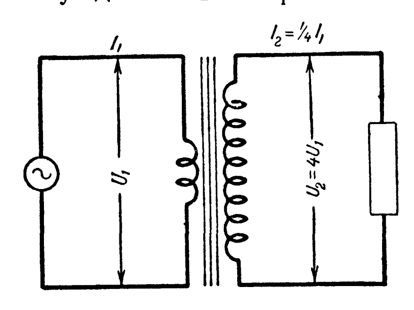
личения магнитного потока, благодаря чему увеличивается индуктивная связь между обмотками.

В трансформаторах, предназначенных для работы при очень высоких частотах переменного тока (радиочастотах), железный сердечник отсутствует, так как связь между обмотками получается достаточно большой и без железного сердечника.

63. КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ

При передаче электрической энергии из одной цепи в другую трансформатор может изменять напряжение как в сторону понижения, так и в сторону повышения в зависимости от соотношения чисел витков первичной и вторичной обмоток. Трансформатор, увеличивающий напряжение, называется повышающим, а трансформатор, уменьшающий напряжение, — понижающим В повышающем трансформаторе число витков во вторичной обмотке больше, чем в первичной, а в понижающем — меньше.

Величина магнитного потока в железном сердечнике трансформатора зависит, главным образом, от напряжения, приложенного к первичной обмотке, и от числа ее витков. Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной обмотке трансформатора, зависит от магнитного потока в сердечнике и от числа витков вторичной обмотки. Отсюда следует, что э. д. с., возбуждаемая во вторичной обмотке трансформатора, зависит от напряжения на первичной обмотке и от соотношения числа витков вторичной и первичной обмоток.



Фиг. 115. Трансформация напряжений и токов в трансформаторе.

Если во вторичной обмотке в четыре раза больше витков, чем в первичной, то напряжение в ней будет в четыре раза больше, а ток в четыре раза меньше, чем в первичной обмотке.

На каждый виток первичной и вторичной обмоток приходится одно и то же напряжение. Если, например, первичная обмотка состоит всего из одного витка, а вторичная — из четырех и при этом к первичной обмотке подведено переменное напряжение, равное 1 *в*, то во вторичной обмотке возникнет э. д. с., равная 4 *в*, т. е. тоже по 1 *в* на каждый виток.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной называют к о э ф ф и ц и е н т о м т р а н с ф о р м а ц и и и обозначают буквой *k*. В приведенном нами примере коэффициент трансформации равен 1 : 4.

Если пренебречь потерями энергии в трансформаторе, которые обычно незначительны, то отношение напряжений в трансформаторе равно отношению чисел витков соответствующих обмоток. Иначе говоря, отношение первичного напряжения к вторичному также равно коэффициенту трансформации.

Трансформатор не является генератором; он только передает энергию из одной цепи в другую. Отсюда следует, что трансформация (изменение) напряжения должна сопровождаться соответствующей трансформацией тока. Если, например, трансформатор повышает в четыре раза напряжение, то в четыре же раза должна уменьшиться сила тока (фиг. 115).

Только при этом условии мощность, отдаваемая в нагрузку вторичной цепью трансформатора, будет равна мощности, потребляемой первичной цепью трансформатора от источника тока.

Трансформатор в этом отношении походит на обычный механический рычаг, который дает выигрыш в силе за счет проигрыша в скорости.

Пример 33. Напряжение сети равно 120 *в*, ток в первичной обмотке трансформатора равен 0,1 *а*, число витков первичной обмотки равно 1 000, а вторичной 50. Определить коэффициент трансформации трансформатора, а также напряжение и ток в нагрузке.

Решение:

1) $U_I = 120$ *в*; $I_I = 0{,}1$ *а*; $w_I = 1\,000$ витков: $w_{II} = 50$; $K = ?$
$U_{II} = ?$ $I_{II} = ?$

2) $K = \frac{w_I}{w_{II}} = \frac{1\,000}{50} = 20$ (трансформатор понижающий).

3) $U_{II} = \frac{U_I}{K} = \frac{120}{20} = 6$ *в*.

4) $I_{II} = I_I \cdot K = 0{,}1 \cdot 20 = 2$ *а*.

64. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Коэффициент полезного действия трансформатора хотя и очень высок, однако он никогда не может быть равным 100%, так как нельзя сконструировать трансформатор, в котором не было бы совсем никаких потерь. Обмотки трансформатора всегда обладают некоторым ваттным сопротивлением, и поэтому ток, протекая по обмоткам, нагревает их. Потери энергии на нагревание обмоток называют потерями в меди.

Часть энергии магнитного поля первичной обмотки затрачивается на периодическое переворачивание (с частотой переменного тока) элементарных магнитиков в железном сердечнике трансформатора, в результате чего сердечник трансформатора тоже нагревается. Эти потери называются потерями на гистерезис.

В сердечнике трансформатора индуктируются вихревые токи (токи Фуко), также нагревающие сердечник. Потери на гистерезис и на вихревые токи называются потерями в железе.

Для уменьшения потерь в меди для обмоток трансформатора следует выбирать провод надлежащего сечения. Для уменьшения потерь на гистерезис имеет большое значение выбор размеров сердечника, числа витков первичной обмотки и качество сердечника.

Число витков первичной обмотки и размеры сердечника должны быть выбраны такими, чтобы обеспечить достаточно большую индуктивность первичной обмотки трансформатора. Чем больше число витков и чем больше сечение сердечника, тем больше индуктивность первичной обмотки, а следовательно и ее индуктивное сопротивление. При большом же индуктивном сопротивлении первичной обмотки она будет потреблять из сети небольшой ток, когда трансформатор со стороны вторичной обмотки не нагружен. Ток холостого хода трансформатора будет невелик, а следовательно, невелики будут и потери в железе на гистерезис. Кроме того, с целью уменьшения потерь на гистерезис сердечники трансформаторов изготовляются из специального трансформаторного железа, содержащего большой процент кремния.

Что касается потерь на вихревые токи, то для их уменьшения сердечники трансформаторов изготовляются из отдельных листов железа толщиной в 0,3—0,5 *мм*, изолированных друг от друга бумагой или слоем лака.

Правильно сконструированный силовой радиолюбительский трансформатор должен иметь к. п. д. около 90%.

В радиолюбительской практике силовые трансформаторы применяются в основном в блоках питания приемников, усилителей или телевизоров. Обычно в трансформаторах этого типа имеется не менее трех, а иногда и до 6 и даже больше обмоток. Обилие обмоток обусловлено необходимостью питать большое число цепей различными независимыми друг от друга напряжениями. При изготовлении силовых радиолюбительских трансформаторов следует обращать особое внимание на изоляцию повышающих обмоток и обмоток, питающих накалы выпрямительных ламп, а также на точное соблюдение числа витков, особенно в понижающих обмотках. При малом числе витков в понижающих обмотках имеет значение даже расположение выводов.

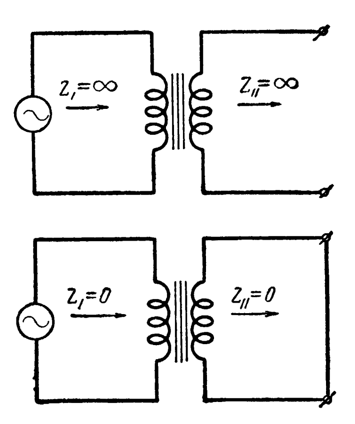
65. СОГЛАСОВЫВАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Ток в первичной обмотке трансформатора зависит от тока в его вторичной обмотке. Если мы будем уменьшать сопротивление нагрузки, присоединенной к вторичной обмотке трансформатора, то это вызовет увеличение тока в ней. Но при этом увеличится ток и в первичной обмотке. При увеличении сопротивления нагрузки, присоединенной к вторичной обмотке трансформатора, ток в его первичной обмотке будет, наоборот, уменьшаться.

Таким образом, входное сопротивление трансформатора Z_I, которое по закону Ома равно напряжению сети U_I, деленному на силу тока в первичной обмотке I_I, зависит от сопротивления нагрузки трансформатора (фиг. 116).

Посмотрим, что происходит в первичной цепи трансформатора, когда вторичная его обмотка ничем не нагружена, т. е. рассмотрим случай холостого хода трансформатора. Если трансформатор сконструирован правильно, то его первичная обмотка имеет достаточно большое индуктивное сопротивление и поэтому ток холостого хода в первичной обмотке будет небольшим.

При подключении к вторичной обмотке нагрузки ток, текущий по виткам вторичной обмотки, будет создавать в сердечнике магнитные силовые линии, направленные против силовых линий, создаваемых током первичной обмотки. В результате ослабления магнитного потока уменьшается э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке, действующая против внешнего напряжения, приложенного к трансформатору, и поэтому увеличивается ток в первичной обмотке. Если замкнуть вторичную обмотку накоротко, то токи в обеих обмотках трансформатора станут настолько большими, что трансформатор может сгореть.



Фиг. 116. Зависимость входного сопротивления трансформатора от сопротивления нагрузки.

Чем больше сопротивление нагрузки, тем больше и входное сопротивление трансформатора.

Найдем количественную зависимость входного сопротивления трансформатора от сопротивления нагрузки в его вторичной цепи

Рассмотрим сначала повышающий трансформатор. В повышающем трансформаторе напряжение во вторичной обмотке U_{II} в $\frac{1}{k}$ раз больше напряжения в первичной обмотке U_I, ток I_{II} в $\frac{1}{k}$ раз меньше тока I_I. Запишем это в виде формул

$$U_I = K \cdot U_{II}; \; I_I = \frac{I_{II}}{K}.$$

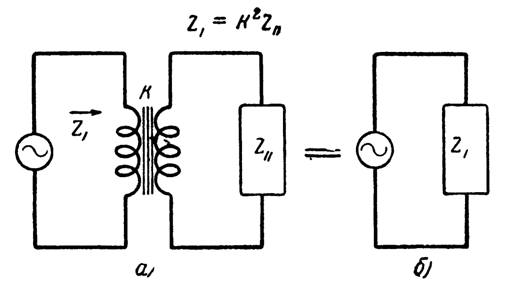
Входное сопротивление трансформатора Z_I по закону Ома равно:

$$Z_I = \frac{U_I}{I_I} = \frac{K^2 U_{II}}{I_{II}}.$$

Но отношение напряжения на нагрузке к току в ней представляет собой сопротивление нагрузки Z_{II}. Следовательно:

$$Z_I = K^2 Z_{II}. \qquad (39)$$

Это значит, что входное сопротивление трансформатора равно сопротивлению нагрузки, умноженному на квадрат коэффициента трансформации, т. е. повышающий трансформатор, вклю-



Фиг. 117. Эквивалентная схема нагруженного трансформатора.

Трансформатор с нагрузкой Z_{II} можно заменить эквивалентным сопротивлением Z_I, равным входному сопротивлению трансформатора; *а*—полная схема; *б*—эквивалентная схема.

ченный между нагрузкой и источником тока, уменьшает сопротивление нагрузки для источника тока, так как в повышающем трансформаторе K — меньше единицы, а понижающий трансформатор увеличивает сопротивление нагрузки, так как в нем K больше единицы.

Этим свойством трансформаторов широко пользуются в радиотехнике для согласования или подбора сопротивления нагрузки для генератора. Например, трехэлектродные лампы обеспечивают хорошую работу тогда, когда сопротивление нагрузки больше внутреннего сопротивления лампы, а пентоды, наоборот, лучше работают в режиме усиления тогда, когда сопротивление нагрузки меньше внутреннего сопротивления лампы. Известно также, что любой генератор, в том числе и ламповый, отдает в нагрузку наибольшую мощность тогда,

когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению генератора.

Во всех этих случаях подбор сопротивления нагрузки осуществляется при помощи трансформаторов.

На основании всего сказанного мы можем схему, изображенную на фиг. 117,*а*, заменить эквивалентной (равноценной) ей схемой, где вместо трансформатора и сопротивления нагрузки к генератору подключено просто сопротивление Z_I, т. е. входное сопротивление трансформатора (фиг. 117,*б*):

Пример 34. Коэффициент трансформации понижающего трансформатора равен 20. Сопротивление нагрузки равно 3 *ом*. Каково будет входное сопротивление трансформатора?

Решение:

1) $K = 20$; $Z_{II} = 3$ *ом*; $Z_I = ?$

2) $Z_I = K^2 \cdot Z_{II} = 3 \cdot 20^2 = 3 \cdot 400 = 1\,200$ *ом*.

Пример 35. Каково будет входное сопротивление повышающего трансформатора с коэффициентом трансформации, равным 1:20, если он нагружен на сопротивление 2 400 *ом*?

Решение:

1) $K = \frac{1}{20}$; $Z_{II} = 2\,400$ *ом*; $Z_I = ?$

2) $Z_I = K^2$; $Z_{II} = \frac{2\,400}{20^2} = \frac{2\,400}{400} = 6$ *ом*.

66. МЕЖДУЛАМПОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

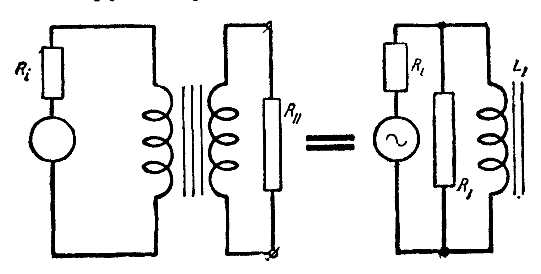
Трансформаторы применяются также в усилителях низкой частоты для связи между каскадами усилителя. Обычно такие трансформаторы являются повышающими.

Основное требование, предъявляемое к трансформаторам этого класса, — хорошая работа на всех частотах звукового диапазона. Равномерность работы трансформатора в широком спектре звуковых частот зависит от многих факторов. Основные из них следующие: индуктивность первичной обмотки, междувитковая паразитная емкость и индуктивность рассеяния.

Что такое индуктивность первичной обмотки, мы уже знаем. Рассмотрим теперь, как она влияет на качество работы трансформатора. На самых низких частотах звукового диапазона индуктивное сопротивление первичной обмотки (ωL_1) будет сравнительно небольшим, а ток через нее повышенным.

В результате увеличения потребляемого тока увеличится падение напряжения на внутреннем сопротивлении R_i генера-

тора, питающего трансформатор, и, следовательно, уменьшатся напряжения как на входе трансформатора, так и на его выходе, т. е. на нагрузке (фиг. 118). Поэтому на низких часто-

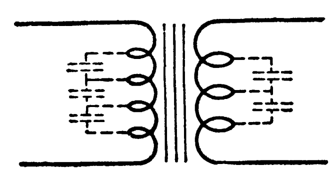


Фиг. 118. ухудшение работы трансформатора в области низших частот звукового диапазона.

Увеличение тока холостого хода равноценно тому, что параллельно пересчитанному сопротивлению нагрузки подключается индуктивность первичной обмотки.

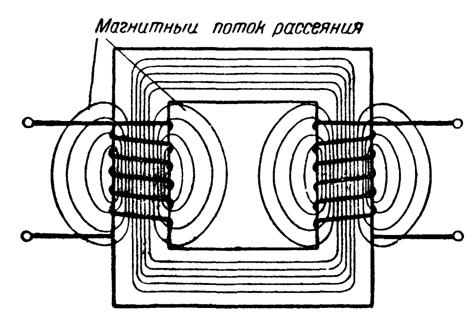
тах звукового диапазона трансформатор работает хуже, особенно, если индуктивность первичной обмотки невелика.

Посмотрим теперь, как будет работать трансформатор на верхних частотах звукового диапазона. На этих частотах индуктивное сопротивление первичной обмотки становится очень большим, а ток холостого хода — малым. Поэтому влиянием



Фиг. 119. Паразитные междувитковые емкости.

Витки трансформатора, лежащие рядом, образуют маленькие конденсаторы, через которые ответвляется часть тока.



Фиг. 120. Неполное использование магнитного потока.

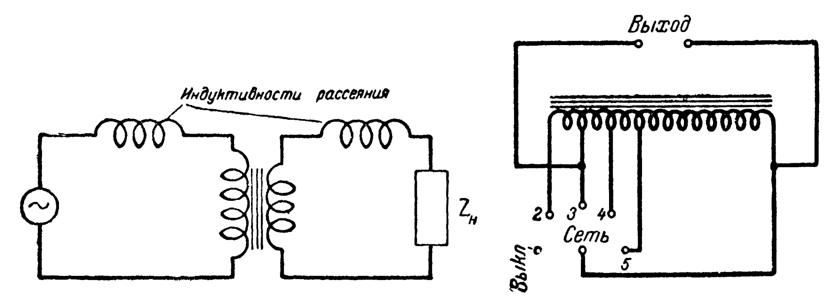
Некоторые магнитные силовые линии не пересекают вторичную обмотку и поэтому наводят э. д. с. не в ней, а в самой первичной обмотке.

индуктивности первичной обмотки на работу трансформатора можно пренебречь. Но при высоких частотах начинают играть заметную роль паразитные емкости между соседними витками обмоток, через которые ответвляется часть тока

(фиг. 119). В результате увеличивается ток, потребляемый трансформатором, а также и падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора, т. е. получается такой же результат, как и при низших частотах, хотя и по другой причине.

Кроме того, во всяком трансформаторе не все магнитные силовые линии, создаваемые ампервитками первичной обмотки, пересекают витки вторичной обмотки (фиг. 120). В результате эти магнитные силовые линии индуктируют э. д. с. не во вторичной обмотке, а в первичной. Благодаря этому между генератором и нагрузкой оказывается как бы включенной последовательно некоторая индуктивность, называемая индуктивностью рассеяния (фиг. 121). На этой индуктивности также происходит падение напряжения, уменьшающее напряжение на нагрузке.

При конструировании трансформатора можно заранее так рассчитать индуктивность рассеяния и междувитковую емкость трансформатора, что на некоторой (высокой) частоте получится резонанс и тогда на этой резонансной частоте напряжение на нагрузке окажется не пониженным, а повышенным. Этим обычно пользуются для улучшения работы междуламповых трансформаторов в области верхних звуковых частот.



Фиг. 121. Индуктивность рассеяния.

В результате падения напряжения на индуктивности рассеяния уменьшается напряжение на нагрузке.

Фиг. 122. Схема автотрансформатора.

Часть витков является общей для обеих обмоток.

67. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформаторами называются трансформаторы, у которых первичная и вторичная обмотки совмещены в одной обмотке (фиг. 122).

Принцип работы автотрансформатора ничем не отличается от принципа работы трансформатора.

Автотрансформаторы применяются в основном для целей регулирования напряжения сети. Для этого одна из обмоток делается секционированной с отводами для того, чтобы можно было по желанию изменять в некоторых пределах коэффициент трансформации автотрансформатора.

Электрические характеристики гальванических элементов и батарей

Типы элементов и батарей	Максимальный разрядный ток, *ма*	Средняя емкость, *ач*	Начальная э. д. с.
Сухие элементы 3С-Л-30	200	30	1,5
3С-Х-30	200	30	1,65
3С-У-30	200	30	1,65
Элементы и батареи с воздушно-марганцовой деполяризацией:			
3С-МВД	50	45	1,4
6С-МВД	150	150	1,4
БС-МВД-45	—	10	50
Сухие батареи: Б-2С-45	—	8	47
БАС-60-Х-0,5	—	0,5	70
БАС-60-У-0,5	—	0,5	70
БАС-80-Л-0,9	—	0,85	94
БАС-80-Х-1	-	1,05	104
БАС-80-У-1	—	1,05	104
БНС-100	—	100	1,54
БС-70	—	7	75
БАС-Г-60-Х-1,3	—	1,3	74

Электрические характеристики накальных и анодных кислотных аккумуляторных батарей

Тип батареи	Напряжение, *в*	Емкость, *ач*	Нормальный ток заряда и разряда
РНП-60	2	60	6
2-РНП-40	4	40	4
2-РНП-60	4	60	6
2-РНП-80	4	80	8
3-РНЭ-40	6	40	4
3-РНЭ-60	6	60	6
3-РНЭ-80	6	80	8
40-РАЭ-3	80	3	0,1
10-РАДАН-5	20	5	0,16
10-РАДАН-10	20	10	0,32
10-РАЭ-5	20	5	0,16

Цена 6 р. 50 к.